

*al prof Anselmi
per omaggio
l'Autore*

I
GHIACCIAI
ANTICHI E MODERNI

DISSERTAZIONE PER ESAME DI LAUREA

IN

SCIENZE NATURALI

Presentata e letta all'Università di Bologna

DA

BARETTI MARTINÒ

Addì 27 maggio 1866



PROVINCIA DI TORINO
BIBLIOTECA

Legato Anselmi

OA. - b

319

I
GHIACCIAI
ANTICHI E MODERNI

DISSERTAZIONE PER ESAME DI LAUREA

IN

SCIENZE NATURALI

Presentata e letta all'Università di Bologna

DA

BARETTI MARTINO

Addì 27 maggio 1866



TORINO

STAMPERIA DI COMPOSITORI-TIPOGRAFI
via del Teatro d'Angennes, 46.

—
1866



ALLA MEMORIA

DI

MIA MADRE

L'esito degli esami precedenti mi autorizzava a scegliere la tesi per il mio esame di laurea in scienze naturali, e fra quelle proposte dal prof. di Geologia nella R. Università di Bologna v'era anche la seguente: *I Ghiacciai antichi e moderni*.

L'argomento era vastissimo ed arduo, pure anche dietro gl'incoraggiamenti dei miei professori e di altri molto versati in questa materia, mi decisi a dare la preferenza a questo tema, sperando si sarebbe tenuto conto della ristrettezza del tempo che mi era concesso, per svolgere un argomento così interessante.

La Commissione esaminatrice accolse con voto favorevole il mio lavoro e m'incoraggiò a stamparlo; ed il signor Ministro per la pubblica istruzione mi accordò a questo proposito un sussidio.

Incoraggiato da tanta benevolenza, e pieno l'animo della più sincera riconoscenza per tutti, mi accingo pertanto a pubblicare la mia dissertazione, pregando il lettore ad accoglierla con indulgenza e come parto di chi muove i primi passi nel difficile cammino della scienza.

Torino, 23 agosto 1866.

BARETTI MARTINO

Dottore in scienze naturali.

I GHIACCIAI

INTRODUZIONE

I Ghiacciai, quelle estese ed imponenti moli di ghiaccio, che in tante forme svariate, sempre meravigliosamente pittoresche, vestono la più alta zona delle nostre Alpi, candide e luccicanti corazze ai picchi più arditi, ai fianchi più scoscesi, concorrono per una gran parte alla orrida, selvaggia, indescrivibile bellezza, per cui va famosa la catena alpina. Poeti, pittori, naturalisti, quelli tutti in cui può l'amor del bello, si arrestarono attoniti compresi da incognita emozione in faccia a quelle immense superficie scintillanti ai raggi del sole delle Alpi per miriadi di cristallini, abbaglianti per inimitabile candidezza; muti contemplarono le stupende cascate, le frane, gli obelischi, le guglie, le piramidi di ghiaccio, ove dal bianco immacolato di non tocca neve si passa per infinite, splendide, delicatissime gradazioni di tinta all'azzurro del cielo, al verde dello smeraldo; raccapricciarono di terrore sull'orlo degli spaventevoli baratri che squarciano la superficie dei ghiacciai, *tombe beanti* sotto il piede dell'incauto alpinista, gelidi, inesorabili sepolcri agli improvvidi viaggiatori; ma per lungo tempo stettero contenti dell'ammirare quelle sublimi ed indescrivibili bellezze, ne subirono il prepotente fascino e le tradussero in ben pallide copie nei quadri e nelle descrizioni di viaggi.

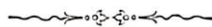
Prima del finire del secolo scorso da pochi vennero fatte osservazioni sul procedere dei ghiacciai, sui fenomeni che presentano all'esame degli studiosi; osservazioni isolate, incomplete, non diligenti per la semplice ragione che non erano dirette ad uno scopo fisso e determinato. Pare impossibile che da solerte e minuzioso osservatore qual era l'infaticabile De Saussure non avesse ne' suoi lunghi viaggi nelle Alpi posto mente ai fenomeni che succedono sui ghiacciai; difatti molto a questo riguardo egli osservò, constatò e descrisse nella sua opera *Voyages dans les Alpes*, e molte idee da lui concepite ebbero sanzione per osservazioni consecutive, e furono il punto di partenza per molti che si diedero in seguito a questo genere di studio.

Lo studio dei ghiacciai non prese un vero sviluppo se non quando si riconobbe la necessità di ricorrere alla loro azione per spiegare una quantità di fatti geologici, per interpretare i quali molte ipotesi erano state emesse, di cui le migliori non erano giunte a convincere e persuadere gli uomini della scienza.

La scintilla che in tanti accese il vivissimo desiderio di studiare a fondo i ghiacciai fu l'asserzione dell'ingegnere svizzero Wenetz, che cioè *i ghiacciai in epoche remotissime avevano dovuto estendersi enormemente più che non oggidì, e che molti depositi superficiali nelle grandi vallate ed allo sbocco delle medesime nelle pianure dovevano attribuirsi all'azione di quegli immensi ghiacciai*; per combattere dapprima, appurare e provare in seguito questa teoria di Wenetz, si sentì il bisogno di studiare minutamente il modo di procedere dei ghiacciai e la natura dei depositi che essi lasciano al loro limite inferiore, ed allora vennero in luce a varii intervalli i lavori pregiatissimi di Charpentier, Agassiz, Forbes, Desor, Tyudall, Ball, Ramsay, Mortillet, Favre, Martius, Dolfus-Ausset, Gastaldi, Omboni, Pirona, lavori di cui farò cenno nel corso della mia dissertazione.

Premesso questo breve cenno sulle cause che diedero impulso allo studio dei ghiacciai, ora cercherò di passare in rassegna i fenomeni più importanti e le principali teorie emesse per spiegarli, esaminandoli sui ghiacciai attuali, per venire in seguito a studiare specialmente sul versante italiano le tracce ed i documenti che provano l'esistenza di ghiacciai antichi.

PARTE PRIMA



GHIACCIAI MODERNI

Capitolo I

Nevi perpetue — Formazione dei Ghiacciai — Struttura del ghiaccio —
Proprietà fisiche del ghiaccio — Accrescimento e diminuzione dei
Ghiacciai.

1°) Le acque che dalla superficie dei mari o dei grandi serbatoi si innalzano nell'atmosfera sotto forma di vapori, rimangono in tale condizione finchè arrivando negli strati superiori atmosferici, ove minore è il grado di temperatura, si trovano in circostanze favorevoli al loro passaggio allo stato liquido, quindi si risolvono in pioggia e più in alto ancora, pel continuo abbassarsi della temperatura, in neve. Le alte montagne perciò appunto che si spingono in quegli strati atmosferici in cui si realizzano le condizioni volute per questo passaggio, sono i punti ove i vapori acquosi più facilmente si risolvono in neve, e ciò succede costantemente per la nostra latitudine ad un'altezza superiore ai 2,700 metri dal livello del mare; ed al disopra della accennata altezza un perpetuo manto di neve ricuopre le inospite regioni alpine.

Coll'accumularsi della neve nei valloni nella loro porzione più vicina all'alto delle catene durante una serie d'anni conse-

cutivi, giacchè l'estate col suo calore non riesce mai a struggerne completamente la neve caduta nell'inverno, hanno origine le nevi perpetue, che oscillando nella loro estensione a seconda del vario grado di temperatura dell'estate, della rigidità della stagione invernale e della umidità atmosferica annuale, si mantengono però sempre superiori ai 2,700 metri sopra il livello del mare; non si può dire però che le nevi perpetue sieno sottratte a quella invariabile naturale vicenda per cui le acque dalla terra vanno al mare, dal mare ritornano alla terra, ma solo rappresentano un periodo di ritardo, una stazione nel compimento di questa circolazione; ove ciò non fosse, risulterebbero delle alternative di grandi e violenti rovinar di acque dalle regioni montuose durante periodi troppo prolungati di soverchia umidità atmosferica, e di protratte siccità in quelle epoche in cui meno satura fosse l'atmosfera di vapori e più alto il grado di temperatura; è facile il concepire come queste alternative sarebbero incompatibili coll'esistenza della vita organica, quindi come sia necessario questo rallentamento nel circolo che devono percorrere le acque; alla stagione estiva corrisponde maggior fusione nelle nevi perpetue, alla invernale arresto di maggior copia di vapori allo stato solido sulle vette delle montagne.

Ciò dà ragione del formarsi di grandi ammassi di neve nelle regioni montuose, ma non ispiega come questa neve pulverulenta, incoerente, possa assumere i caratteri del ghiaccio e costituire così un ghiacciaio. Qui conviene osservare che la neve nelle regioni alpine non cade in falde o fiocchi come suol fare nelle pianure e nelle regioni meno elevate, ma bensì sotto forma di granellini compatti, incoerenti, asciutti, coperti da una specie di vernice di ghiaccio, che secondo Charpentier, sarebbe già il risultato d'una fusione superficiale e successiva congelazione operatasi sulla neve primitiva; anzi lo stesso autore cita esempi rarissimi di neve in falde caduta sulle vette alpine; questa forma di presentarsi della neve ricevette dagli alpigiani il nome di *grésil*.

Le nevi perpetue costituiscono una specie di zona che fascia la parte più elevata d'una catena montuosa, zona da cui emergono i picchi, le creste e le cortine di roccie, che per avere i loro fianchi a pareti quasi verticali non danno appiglio alla neve, per

cui questa non può rivestirli come fa de' pendii più dolci e del fondo dei valloni. Questa zona si può dividere con Charpentier in tre regioni, una più elevata detta l'alta nevata, una mediana il ghiacciaio, una terza inferiore la bassa nevata. Quest'ultima risulta costituita da quelle striscie di neve generalmente poco sviluppate, che per trovarsi in condizioni favorevolissime alla fusione facilmente si struggono ed il prodotto dello squagliamento non si converte in ghiaccio, nè s'arresta nella massa nevosa, ma invece si disperde sulle roccie sottostanti; la bassa nevata col suo restringersi od estendersi, collo scomparire o col ricomparire, segna per così dire il variare annuo delle condizioni atmosferiche delle regioni delle nevi eterne, ed è in essa che è reso sensibile l'oscillamento della zona nevosa. La mediana o il ghiacciaio propriamente detto è la parte più sviluppata delle tre costituenti la zona: essa riempie il fondo dei valloni, veste i pendii meno scoscesi, raramente sale sulle vette e sulle creste, e dove ciò succede si trasforma gradatamente in alta nevata, la sua potenza può giungere a parecchie centinaia di metri; ricoperta raramente in estate dalla neve, consta in tutta la sua massa di vero ghiaccio granelloso, attraversato da innumere fessure capillari negli strati superiori, limpido ed ampolloso negli strati profondi, squarciato generalmente da spaccature più o meno larghe, che prendono il nome di crepaccie; sul ghiacciaio la neve si fonde, penetra nella massa, la imbeve, ma non la attraversa, e dove una quantità d'acqua riesca a liberarsi dalla massa del ghiacciaio e ad uscire dalla superficie inferiore di esso, non è che il superfluo della imbibizione, e non è certamente quella che costituisca per sè sola i torrenti che scendono verso le vallate; vedremo in seguito come i ghiacciai abbiano bisogno di quest'acqua che li imbeva e dia loro un certo grado di plasticità.

Nella parte più elevata della zona la fusione si opera superficialmente, ma in iscala molto minore, e quando essa si opera l'acqua che ne risulta attraversa la massa, imbeve gli strati inferiori convertendo l'alta nevata in vero ghiacciaio; ora, come questa conversione si opera con tutta agevolezza per poco che sia ragguardevole lo spessore dell'accumulamento di neve, ne viene che l'alta nevata non può avere una grande potenza e non potrà realmente sussistere che là dove pochissima è la fusione; difatti la neve

incoerente e granulare non s'incontra che sulle vette e sulle creste culminanti, e raramente raggiunge una potenza superiore ai 3 od ai 4 metri; per quei ghiacciai che giungono a poggiare il loro limite superiore nelle altitudini dell'alta nevata, questa ne ricopre l'origine, anzi si può dire che i ghiacciai prendono origine da essa, e convertendosi gli strati profondi della nevata gradatamente in vero ghiaccio, non si può fissare un limite ove finisca l'una ed ove cominci l'altro; non riuscendo mai il calore estivo a fondere completamente l'alta nevata dell'inverno precedente, ne verrà nella massa di essa una vera stratificazione messa in evidenza dal pulviscolo che trasportato dai venti e dalle bufere deturpa la candida superficie della neve. Può avvenire che l'alta nevata raggiunga una potenza maggiore a quella più sopra accennata, ma ciò succede unicamente in quei casi eccezionali in cui essa trova punti d'appoggio negli spacchi, nelle lacerazioni che presentano talvolta le pareti dei picchi o delle cortine di roccia, e basta talvolta l'imperversare delle bufere per smuovere e far rovinare in basso questi cumuli eccezionali di neve pulverulenta.

La parte mediana, cioè il vero ghiacciaio, per un moto suo proprio di cui parlerò in seguito, può discendere più in basso del limite inferiore delle nevi perpetue fino ai 1,400 metri sul livello del mare; il signor Rendu chiamò *Glaciers reservoirs* quelli che stanno al disopra dei 2,700 metri, perchè in essi si opera la conversione della neve in ghiaccio; chiamò poi quella porzione di essi che si spinge in basso nella regione delle foreste, dei pascoli e degli abitati, *Glaciers d'écoulement*; nei primi comprese la parte superiore dei ghiacciai di Charpentier e l'alta nevata; sotto la seconda denominazione la parte inferiore dei ghiacciai e la bassa nevata.

Agassiz chiamò *Glaciers proprement dits* quelli *d'écoulement* di Rendu; colla denominazione di *Mers de glace* i *réservoirs* di Rendu, comprendendo sotto di essa la regione del ghiaccio compatto di Charpentier; e chiamò infine campi di neve l'alta nevata.

2°) Dopo considerata la zona delle nevi perpetue nelle tre regioni che la caratterizzano, ora conviene esaminare come abbia luogo la formazione della porzione mediana del ghiacciaio. Grüner

credette che il ghiaccio compatto che costituisce i ghiacciai non fosse altro che il risultato della congelazione di quell'acqua di fusione delle nevi che non poteva scorrere liberamente verso le vallate sottostanti; a far vedere come sia inesatta questa opinione di Gruner basta il mettere a confronto due pezzi di ghiaccio, l'uno risultante dalla semplice congelazione dell'acqua, l'altro tolto dalla massa d'un ghiacciaio; la struttura areolare granulosa di quest'ultimo rivela un'origine ben diversa da quella del ghiaccio comune compatto ed omogeneo.

Charpentier osservò giustamente che l'acqua di fusione dello strato superficiale dei grandi accumulamenti di neve penetrava nella massa sottostante, cementava fra di loro i granuli isolati della neve, e produceva in tal modo un ghiaccio bolloso e costituito di una quantità di elementi granulari, quali appunto si possono osservare ne' ghiacciai. Però, secondo lo stesso autore, ciò non bastava, ed era necessario l'intervento d'un abbassamento di temperatura che congelasse l'acqua interposta ai granuli primitivi onde la neve assumesse tutti i caratteri di ghiaccio. Questa congelazione succede realmente, ma solo per quegli strati che costituiscono la porzione superficiale del ghiacciaio, i soli che siano sensibili agli abbassamenti di temperatura che possono occorrere nell'atmosfera, capaci di ridurre l'acqua liquida allo stato solido. Gli studi, gli esperimenti fatti da Agassiz nel 1842 sul ghiacciaio dell'Aar dimostrano come ad una certa profondità della massa del ghiacciaio la temperatura non sia inferiore a 0° gradi, come quindi non si possa ammettere per tutta la potenza del ghiacciaio la congelazione dell'acqua che la imbeve. L'agente principale per la conversione della neve in ghiaccio è la pressione; difatti il ghiaccio d'un ghiacciaio è molto più compatto di mano in mano che noi scendiamo nella sua profondità, e l'acqua che negli strati superiori si manteneva isolata dai granuli di ghiaccio negli spazi areolari, negli strati più profondi si compenetra talmente nei granuli primitivi e così ristretti diventano gli spazii areolari, che il ghiaccio si avvicina sempre più alla condizione che noi comunemente osserviamo nella semplice congelazione dell'acqua. Da ciò ne risulta che per la formazione d'un ghiacciaio non è necessario un soverchio abbassamento di temperatura, ma basta la pressione la quale

avvicini e comprimi fra di loro i granuli primitivi di neve che furono cementati dalle acque di fusione; con sola neve noi non possiamo avere del ghiaccio di ghiacciaio, neppure lo avremo colla semplice congelazione dell'acqua, ma si esigono per la sua formazione il concorso contemporaneo d'acqua che cementi i granuli nevosi e della pressione che li ravvicini e li comprimi. Questo è il modo con cui si formano i ghiacciai, ed a questo riguardo pare cessata ogni controversia fra coloro che si occuparono di questi studi.

3°) Gli elementi che costituiscono il ghiaccio dei ghiacciai si riducono da ciò che più sopra esposi a granuli di neve agglutinati ed acqua interposta; a questi si aggiunge un terzo elemento, ed è l'aria che in bolle più o meno voluminose si trova in tutte le parti d'un ghiacciaio. I granuli che in un colle cellule ripiene d'acqua allo stato liquido, ed alle bolle d'aria danno l'aspetto ampolloso e granulare che distingue il ghiaccio così formato, provengono senza dubbio dalla fusione superficiale dei granellini di neve, in seguito alla quale fusione questi si agglutinano e riuniscono in masse tondeggianti dapprima, ma che per la pressione si riducono ben presto negli strati profondi del ghiacciaio ad una forma pseudo-poliedrica: configurazione caratteristica delle sostanze dotate d'una certa mollezza, assoggettate a pressioni che si esercitano egualmente in tutti i sensi; a produrre questa fusione superficiale basta quel piccolo grado di calore che porta seco nell'interno della massa nivea l'acqua risultante dallo squagliamento degli strati più superficiali sferzati lungo le giornate estive dai caldi raggi solari. Charpentier, considerando che l'acqua di fusione che s'infiltra nella massa nivea possa congelarsi per intero coll'abbassarsi delle temperature esterne, fece derivare i granuli poliedrici dal ghiaccio da ineguali dilatazioni che operandosi nel sovraccennato congelamento avrebbero fratturate le masse del ghiacciaio con innumerevoli fessure capillari tagliantisi ad angoli in tutte le direzioni; questa spiegazione dell'illustre Charpentier può convenire unicamente per gli strati superficiali del ghiacciaio, i soli sensibili alle variazioni di temperature atmosferiche; ma provato che ad una certa profondità l'acqua si mantiene costantemente allo stato liquido, non si saprebbe spiegare l'origine di quelle innumerevoli fessure capillari che isolando

una infinità di piccole masse poliedriche darebbero al ghiaccio del ghiacciaio la struttura granulare.

I granuli sono separati l'uno dall'altro da spazi interstiziali ripieni in parte da acqua allo stato liquido, e in parte da bollicine di aria. L'acqua accennai già provenire dalla fusione superficiale; essa può congelarsi negli strati superiori del ghiaccio; ma negli strati profondi rimane allo stato liquido, poichè la temperatura d'essi è mai inferiore allo 0° , ed ove per circostanze eccezionali potesse discendere più in basso di 0° sarebbe solo di qualche frazione di grado, e l'acqua continuerebbe a rimaner liquida per causa solo della pressione a cui è assogettata; stantechè essa per congelarsi ha bisogno di dilatarsi, ma trova una pressione tale per cui questa dilatazione è vietata. Discendendo negli strati più profondi del ghiacciaio, la pressione si fa sempre maggiore ed arriva ad un grado tale che l'acqua imprigionata negli spazi interstiziali è obbligata ad immedesimarsi quasi coi granuli iniettandosi in fessure piccolissime e impercettibili che attraversano i granuli stessi; dà ciò maggior limpidezza e compattezza del ghiaccio degli strati più profondi. Alcuni negarono le impercettibili fessure che accennai esistere nei granuli; ma se noi tagliamo una sottilissima lamina del ghiaccio più compatto che possiamo incontrare nelle viscere d'un ghiacciaio, soffiando violentemente sovra una delle sue faccie riusciamo a spostar l'acqua liquida che occupava quelle fessure, la quale essendo rimpiazzata dall'aria, il ghiaccio della lamina, da limpido che era dapprima, assume una tinta opaca; ciò prova ad evidenza l'esistenza delle fessure accennate nel granulo di ghiaccio.

La candidezza della neve è dovuta ad una quantità di aria interposta alle particelle di essa; nella pressione che si esercita nella massa d'un ghiacciaio una porzione di quest'aria rimane imprigionata e costituisce le bollicine che danno l'aspetto ampolloso ben conosciuto da chi vide anche per una sol volta il ghiaccio che si produce dalle nevi perpetue; analogamente all'acqua interposta, le bollicine d'aria soffrono una pressione che aumenta di mano in mano che si discende nelle profondità del ghiacciaio; ciò fa sì che da tondeggianti che erano dapprima si appiattiscono ed assumono la configurazione lenticolare tantochè negli strati più profondi hanno

una dimensione di gran lunga superiore in lunghezza che non in larghezza. Nell'operarsi di fessure negli strati superficiali in seguito ad ineguali dilatazioni prodotte dal congelamento dell'acqua, una gran parte dell'aria vienè a liberarsi dalla massa del ghiacciaio; ma quella che rimane rinchiusa nelle parti profonde non può più uscire dal ghiaccio se non nel caso di lacerazioni comunissime nei ghiacciai, che scendono a grandi profondità e che sono conosciute sotto il nome di crepaccie; il formarsi d'una soluzione di continuità nel ghiacciaio per una vera lacerazione è preceduta da un affioramento di molte bollicine d'aria, ed Agassiz riferisce il caso osservato da lui, nel quale potè stabilire dall'affioramento di queste bollicine la direzione in cui si sarebbe formata una crepaccia; le sue previsioni furono pienamente confermate.

4°) Un fatto importantissimo che può dare spiegazione di massimo interesse sui fenomeni glaciali è certamente la temperatura dell'interno della massa del ghiacciaio.

La difficoltà delle osservazioni ad una grande profondità fecero sì che la temperatura dell'interno del ghiacciaio fu da molti dedotta indirettamente da fenomeni che spiegarono secondo le loro vedute parziali; da ciò grande discrepanza d'opinioni che arrecavano più danno che vantaggio alla scienza. Agassiz fu il primo a ricorrere alla sonda, ed in molti anni di continue e ripetute esperienze, lottando contro immense difficoltà, riuscì ad operare ricerche fino alla profondità di 60 metri nelle viscere del ghiacciaio dell'Aar. Finchè si trattava di determinare la temperatura durante la bella stagione, la cosa era abbastanza facile, e trovò che nell'estate le variazioni delle temperature esterne non sono sensibili se non negli strati che non sono superiori agli 8 metri di profondità; per la porzione di ghiacciaio inferiore agli 8 metri la temperatura era costantemente a 0°; la parte superficiale però in estate discendeva anche al disotto di 0° durante la notte, ed ecco perchè la dilatazione per congelazione dell'acqua, e la formazione delle fessure si osserva solamente in questa parte superficiale. Durante il giorno però la temperatura è di poco superiore allo 0°. Rimanendo nell'interno costante a 0° gradi, l'acqua vi rimane permanentemente allo stato liquido, condizione indispensabile per la plasticità del

ghiaccio. Procedendo verso la stagione invernale, il freddo esterno si addentra più profondamente nella massa, l'acqua vi si congela a maggiori profondità, e da ciò vedremo dipendere la minor quantità del movimento proprio del ghiacciaio durante l'inverno. Le ricerche della temperatura interna durante la stagione invernale richiesero più anni di fatiche, e non si ottennero risultati soddisfacenti se non quando furono lasciati per due anni consecutivi dei termometrografi a varie profondità nel ghiacciaio; questi risultati li dobbiamo alla costanza esemplare di Agassiz, che non curò disagi, rischi e dispendii per giungere allo scopo che si era prefisso. Ciò che prova il congelarsi dell'acqua infiltratasi negli strati superiori, e il rimaner liquido di essa al disotto degli 8 metri durante le notti estive, si è che occorre molte volte ad Agassiz di trovare gli astucci metallici involgenti i sostegni dei termometrografi quasi aderenti al ghiaccio in corrispondenza della parte superficiale del ghiacciaio, liberi al disotto di 8 metri. Alcuni ammisero obiezioni contro l'asserzione che la neve invernale possa in certo qual modo proteggere dal freddo esterno la sottostante massa di ghiaccio; e si fondarono sul fatto che i termometrografi lasciati durante l'inverno segnavano una minima di $-2^{\circ},2$ alla profondità di 4 metri; ma non posero mente che nell'istesso tempo la neve era discesa ad una temperatura di -3° : quindi il ghiacciaio essendo ad una temperatura superiore a quella della neve sovra incombente, è chiaro che ciò è dovuto ad un'azione protettrice della neve stessa; che ove il ghiaccio fosse rimasto allo scoperto, esso sarebbe disceso a -3° e forse anche più basso.

I risultati delle ricerche di Agassiz non danno veramente il 0° nella massa profonda, ma una qualche frazione di grado in meno; ma bisogna considerare che nell'atto stesso del traforo si dava adito alla temperatura atmosferica, per cui la variazione esterna riusciva più sensibile colà che non nel restante della massa di ghiaccio.

Trattando delle proprietà fisiche del ghiaccio dei ghiacciai torna opportuno l'accennare la teoria della viscosità emessa da Forbes, e quella della plasticità di cui è campione il Tyudall. Forbes considerò il ghiacciaio come una massa vischiosa i cui elementi godevano d'una certa libertà gli uni rispettivamente agli altri, e volle

con questa viscosità del ghiaccio spiegare il moto di discesa da cui è animato ogni ghiacciaio. Forbes non fece distinzione tra viscosità e plasticità; è certo che essendo il ghiaccio dei ghiacciai costituito da elementi solidi tenuti assieme da un elemento liquido quale è l'acqua d'imbibizione, non potrà il ghiacciaio considerarsi come una massa rigida, come volle fare il Gruner; però il ghiaccio come lo si incontra nelle regioni glaciali ubbidisce alla pressione, ma si mostra ritroso ad una tensione che superi un certo limite, il qual limite è di molto inferiore a quello a cui possono giungere nella distensione le vere sostanze viscosi. Se il ghiaccio fosse viscoso non si saprebbero spiegare le frequenti soluzioni di continuità prodottesi per soverchia tensione, ed ognuno che abbia visitati i ghiacciai ha potuto vedere in qual numero e con quale sviluppo si formino tali lacerazioni nella massa del ghiaccio. I difensori di Forbes dissero ch'egli sotto il nome di viscosità voleva accennare a plasticità, e che mai avea preteso di rassomigliare il ghiaccio alle sostanze veramente vischiose, come ad esempio, il miele, la pece ed altre.

Agassiz dapprima, Tyudall in seguito chiamarono plastico il ghiaccio dei ghiacciai; difatti una sostanza plastica risulta da elementi che possono liberamente muoversi gli uni sugli altri in forza d'un elemento liquido o semi-liquido che li tiene uniti; togliamo questo elemento intermediario e la sostanza plastica diventa rigida. Analogamente se noi leviamo al ghiaccio dei ghiacciai l'acqua interposta, esso diventa rigido e non presenta più i fenomeni di plasticità. Se noi confrontiamo il ghiaccio e l'argilla plastica, troviamo certamente delle grandi analogie; se all'argilla togliamo l'acqua interposta alle sue particelle, essa diventa rigida; se l'argilla la sottoponiamo ad una tensione, resiste pochissimo e si rompe; se sottoponiamo il ghiaccio e l'argilla alla pressione, noi possiamo configurare tanto l'uno quanto l'altro a quel modo che vogliamo. Faraday osservò che due pezzi di ghiaccio possono saldarsi assieme, ove le superficie che vengono a contatto siano umettate; da ciò Tyudall dedusse che nel ghiacciaio il ghiaccio continuamente si frattura, continuamente si risalda; egli pose in vari modelli di legno e sottomise quindi a pressione dei pezzi di ghiaccio e riuscì a foggare in forme svariate il ghiaccio stesso; spiegando il feno-

meno con una frammentazione del ghiaccio, un consecutivo adattarsi dei frammenti alla configurazione dello spazio in cui erano compresi, e un successivo risaldamento d'essi frammenti; per cui in ultimo si avea un pezzo di ghiaccio d'una compattezza analoga alla primitiva. Questi esperimenti ingegnosissimi provano che sotto la pressione si sviluppa un certo calore capace di far fondere alla superficie i frammenti di ghiaccio, ma che essendo questo calore istantaneamente assorbito da tutta la massa, l'acqua interposta si rigela, saldandosi per tal modo i frammenti stessi. Ma una sostanza che sotto la pressione si riduce a frammenti, può chiamarsi plastica? Può veramente l'esperienza di Tyudall giungere a provare la plasticità del ghiaccio dei ghiacciai? Pare di no; l'argilla plastica assoggettata ad una pressione per quanto energica non si frammenta, ma si modella.

Tutto induce a considerare il ghiaccio dei ghiacciai come una sostanza plastica, tanto più se si pon mente all'arrendevolezza con cui un ghiacciaio obbedisce alle accidentalità del letto e dei fianchi fra i quali scorre, ed all'intima struttura del ghiaccio stesso.

Nelle esperienze di Tyudall la pressione esercitata rapidamente produce dei fenomeni, che non può produrre nel ghiacciaio ove agisce non ad urti, ma continua, costantemente uniforme; in piccoli pezzi di ghiaccio le rapide variazioni di temperatura determinano dei fenomeni che certamente non hanno luogo nelle immense masse di ghiaccio dei ghiacciai, ove le variazioni di temperatura si operano lentamente nella parte superficiale, son nulle nella parte profonda; le condizioni in cui si trovano il ghiaccio del ghiacciaio ed il ghiaccio delle esperienze di Tyudall son troppo diverse perchè ci possano dare un'idea vera ed esattissima dei fenomeni interni del ghiaccio delle nevi perpetue. Questa parte dello studio dei ghiacciai è importantissima, presenta ancor molto all'osservazione, quantunque abbia già dato luogo a pregiati lavori; richiedendo poi esperimenti delicatissimi e lunghi, io mi riconosco inabile a formulare una opinione precisa ed esplicita; però mi limitai ad accennare i dubbi che nacquero in me riguardo alle asserzioni ed alle esperienze di Tyudall.

Tra i caratteri fisici del ghiaccio conviene esaminare la colora-

zione. Chi visita i ghiacciai per la prima volta coll'idea di trovare un immenso ammasso cristallino, limpido, ricco di riflessi azzurrognoli, rimane meravigliato d'incontrarli invece dotati d'un color bianco opaco che li fa rassomigliare ad accumulamenti piuttosto di neve, che di vero ghiaccio. Ed infatti dev'essere così; rammentiamoci la struttura del ghiaccio dei ghiacciai: principalmente alla superficie esso è eminentemente granulare, e contiene una grande quantità di bollicine d'aria; ora a quest'aria inclusa è dovuto il colore bianco opaco del ghiaccio; l'acqua congelata, compatta, priva di screpolature e di vani in cui possa trovarsi imprigionata dell'aria è limpida e trasparente; proviamoci a ridurla in frammenti, l'aria che s'infiltra tra gl'interstizi ne offusca completamente la limpidezza, e le dà un colore bianco opaco; polverizziamo il ghiaccio, abbiamo una massa della candidezza della neve. Le superficie del ghiacciaio in certi casi, le pareti delle crepaccie e delle frane presentano però degli splendidi riflessi azzurrognoli, che sono la meraviglia dei viaggiatori; essi sono dovuti unicamente a fenomeni di riflessione e rifrazione, e si verificano là dove il ghiaccio è più compatto, contiene minor quantità di bollicine aeree, ed è maggiormente imbevuto di acqua; difatti nelle giornate umide più intense riescono quelle colorazioni; quindi si può concludere che all'aria è dovuto l'imbiancamento e l'opacità del ghiaccio, all'acqua i colori più vivi e la limpidezza. Taluno volle attribuire i riflessi azzurri ed in certi casi anche verdastri del ghiaccio a dei cloruri metallici sospesi in particelle estremamente fine nel ghiaccio stesso analogamente a ciò che si ammette per la tinta riccamente celestrina delle acque del lago di Ginevra, principalmente al punto di uscita del Rodano; però osservazioni speciali non hanno confermata questa opinione, e i soli fenomeni di riflessione e di rifrazione intervengono in queste colorazioni. Larghe zone del ghiaccio colorate in bigio o bianco lucido sono dovute al disperdersi sulla superficie dei pulviscoli e delle sabbie finissime portate dal vento, dalle bufere e dagli uragani.

Talvolta la neve più superficiale, non ancora convertita in ghiaccio, presenta un colore rossastro analogo a quello del sangue molto diluito. Questa colorazione può estendersi anche su una larga estensione e discendere di qualche piede nella profondità del ghiacciaio;

Saussure, che primo osservò questo fenomeno, l'attribuì ad una alga che chiamò *Protococcus nivalis*; in seguito, gli studi di Schuttlewalt, di Vogt, di Bassevitz fecero risultare l'esistenza di molti infusori di specie svariatissime, che non possono vivere che alla temperatura del ghiaccio fondente, e concorrono per la massima parte alla produzione di queste colorazioni rosee della neve.

Schuttlewalt descrisse minutamente le specie da lui osservate, molte delle quali sono riferibili a generi stabiliti da Ehrenberg. Di questi infusori, alcuni sono di colore rossastro chiaro od anche intenso come l'*Astasia nivalis*, il *Gyges sanguineus*, altri di color bigio chiaro come la *Pandorina hyalina*, altri infine perfettamente trasparenti come alcune specie di *Monax*. I più voluminosi fra questi infusori giungono appena ad $\frac{1}{8}$ di millimetro, e sotto il campo del microscopio si muovono con una grande rapidità. A dar il color roseo alla neve oltre a questi infusori contribuiscono pure colle loro spore alcune alghe, fra cui il *Protococcus nivalis* di Agardh, l'*Hematococcus sanguineus*, il *Gloiococcus Grevilli*. Dunque la regione delle nevi perpetue non è inanimata, ed oltre al vegetale il regno animale ha pur anche i suoi rappresentanti in quelle zone deserte e credute per lungo tempo prive d'ogni traccia di vita. E chi può sapere quante specie nuove d'infusori non si scopriranno in seguito col progresso della scienza? È difatti difficile lo immaginare che le miriadi di esseri piccolissimi che danno il color roseo a larghi tratti di neve si debbano aggruppare attorno a tipi di poche specie. Il signor Hugi trovò nel 1829 sul ghiacciaio dell'Aar della neve colorata in giallo vivace, e ne attribuì la colorazione alla presenza d'un essere organizzato; Agassiz, nel 1840, trovò che essa doveva attribuirsi alla decomposizione delle rocce costituenti le morene vicine.

5°) Vediamo ora da quali cause dipendono l'alimentazione e la distruzione di un ghiacciaio. I ghiacciai d'oggi oscillano nella loro estensione entro limiti abbastanza ristretti, ed il loro allungarsi ed il loro accorciarsi si riducono a pochi metri per ogni anno; l'esistenza però di tracce di ghiacciai ora lontanissime dalla zona delle nevi perpetue ci dimostra come l'allungarsi ed il ritirarsi dei ghiacciai in epoche antichissime si compiessero su una scala molto più

imponente che non oggidì. Egli è certo che i ghiacciai in un certo numero d'anni dovrebbero intieramente scomparire ove nella loro massa non avvenisse un aumento di materiale a controbilanciare la diminuzione prodotta dalla continua fusione; durante la stagione estiva, principalmente nelle ore calde della giornata, la fusione si compie in proporzioni ragguardevoli, e l'acqua che ne risulta eccede di gran lunga la quantità necessaria ad imbevare la massa del ghiacciaio, per cui il superfluo scorrerà sulla superficie e andrà ad ingrossare il torrente che nasce al limite inferiore del ghiacciaio stesso. Nel suo rapido passaggio quest'acqua lava e spazza la superficie del ghiacciaio, strascina i detriti di rocce più leggieri, e da ciò l'intorbidamento delle acque dei torrenti alpini nelle ore pomeridiane; come pure si spiega per tal modo lo schiarirsi delle medesime nelle ore mattutine, ove si consideri che durante la notte la fusione è completamente cessata, e che l'acqua che sgorga dal ghiacciaio avendolo traversato in tutta la sua massa si è purificata per una filtrazione. I ghiacciai non si fondono che per la superficie superiore, la fusione che si opera per la loro faccia inferiore è puramente eccezionale, dovendosi considerare presso che nulla l'azione del calore centrale sul ghiaccio dei ghiacciai; l'acqua che sgorga dalla parte inferiore del ghiacciaio è dovuta per la massima parte a quella di fusione che dopo aver imbevuta la massa, finisce per gocciare e radunarsi in rivoli nel fondo di roccia sottostante. Agassiz dà il nome di ablazione a questa continua distruzione del materiale che costituisce la superficie del ghiacciaio. A provare come sieno gli strati superiori quelli che vengono distrutti dall'ablazione, basta il considerare la purezza del ghiaccio in tutta la sua massa e la mancanza di frammenti e di detriti di roccia ad una certa profondità; ogni anno una quantità enorme di massi, di schegge, di rocce, di detriti, di sabbie precipitano dalle vette circostanti sul ghiacciaio e si seppelliscono nella neve recente; se il ghiacciaio si fondesse per la sua parte inferiore ed intatta rimanesse la parte superficiale, ogni anno si formerebbe un nuovo strato di neve mescolata ai materiali sovraccennati che si sovrapporrebbe a quello dell'anno precedente, e finirebbe un ghiacciaio a presentare l'aspetto di un vero conglomerato, i cui elementi di mole variabilissima sarebbero cementati dal ghiaccio; ed è ciò appunto che non si osserva;

anche che un masso di roccia si trovasse ad una certa profondità dal ghiacciaio, finirebbe sempre per affiorare alla superficie, poichè lo strato di ghiaccio che la rinchiude, venendo distrutti dalla fusione i sovrastanti, finisce per trovarsi allo scoperto, e diventare alla sua volta strato superficiale.

Le nevi che cadono direttamente sul ghiacciaio, le valanghe che precipitano dalle alte nevate, i nevischi portati dalle bufere e dagli uragani, le piogge che infiltrandosi nel ghiacciaio vanno aumentando la quantità d'acqua che l'imbeve, sono le fonti principali di conservazione e di alimentazione del ghiacciaio stesso. Nelle alte nevate, quando raggiungono un notevole spessore, i loro strati inferiori, sia per la pressione esercitata d'alto in basso, come per l'acqua di fusione che l'imbeve, si trasformano in ghiaccio, e nel maggior numero di casi i ghiacciai hanno origine dalle alte nevate; ciò è tanto più facile a concepirsi quando si consideri che quasi tutti i ghiacciai alla loro porzione terminale superiore sono coperti dalle alte nevate; di mano in mano che il ghiacciaio pel suo movimento di discesa si porta in basso, l'alta nevata discende anch'essa e passa allo stato di ghiaccio. Le valanghe di neve son forse quelle che contribuiscono meno alla conservazione ed all'aumento del ghiacciaio, e la loro importanza fu molto esagerata da alcuni osservatori; ciò nullameno fa d'uopo tenerne conto. Chi ha viaggiato nelle Alpi sa quale sviluppo possono raggiungere negli anfiteatri, nei burroni, nelle gole circondate da alte pareti di rocce gli accumulamenti di neve portata dalle bufere, quindi queste più delle valanghe si devono considerare fra le principali sorgenti d'alimentazione dei ghiacciai. L'abbondanza della neve invernale che cade nelle regioni elevate e per conseguenza sui ghiacciai la fanno considerare come quella che più contribuisce a mantenere l'equilibrio tra la loro distruzione e la loro conservazione. Ho detto come le piogge possono agire nell'alimentazione del ghiacciaio; conviene però osservare che ove la pioggia fosse troppo prolungata, sarebbe agente più di distruzione che di conservazione del ghiacciaio, giacchè introdurrebbe nella massa un grado di calore capace d'indurre una soverchia fusione negli elementi che lo costituiscono. La neve non alimenta il ghiacciaio per una semplice accumulazione, ma bensì per

il fatto d'infiltrazione dell'acqua di fondita superficiale nelle sottostanti masse di ghiaccio.

Si comprende facilmente che l'alimentazione e la distruzione di un ghiacciaio si possono operare in proporzioni diverse per cui è possibilissimo avere disequilibrio; la neve caduta supera in quantità quella che si scioglie, ed allora l'alimentazione predomina sulla distruzione, ed il ghiacciaio si allunga; è preponderante la quantità di fusione, e il ghiacciaio si ritira; influiscono a questo disequilibrio la posizione del ghiacciaio, il suo spessore, l'inclinazione del suo letto, le accidentalità della roccia incassante, i venti che dominano durante l'annata, infine una quantità di circostanze la cui influenza facilmente si può comprendere senza che richiedano ulteriori commenti e spiegazioni.

Capitolo II

Movimenti dei Ghiacciai — Teoria per spiegarne la causa — Modo di constatarli — Fenomeni che si riferiscono al movimento dei Ghiacciai — Crepacci — Vortici — Morene — Azione sulle rocce incassanti il Ghiacciaio.

1°) I ghiacciai sono animati da un moto di progressione e di espansione che si determinano nel senso della lunghezza, dello spessore e della larghezza; da ciò la divisione in tre movimenti distinti, l'uno longitudinale, il secondo d'espansione che si rende sensibile per un innalzamento di livello, il terzo finalmente trasversale su una linea che congiunge la porzione mediana ai margini laterali del ghiacciaio.

A constatare il movimento di progressione dei ghiacciai concorrono moltissimi fatti osservati fin dalle prime epoche dello studio delle regioni glaciali alpine. Gli abitatori delle alte montagne avvertirono in ogni tempo il moto longitudinale dei ghiacciai da fatti che non ammettono dubbio alcuno. L'allinearsi dei frammenti di roccia che cadono sul ghiaccio, le strie ed i solchi impressi sulle pareti su cui posa la massa del ghiaccio, infine l'addentrarsi talvolta dei ghiacciai nelle regioni delle foreste e dei pascoli son documenti naturali che provano a sufficienza il moto di progressione. Uno dei più zelanti osservatori dei fenomeni glaciali, il signor Hugi, avea costruito un ricovero al punto di unione dei due ghiacciai di *Finsteraar* e *Lauteraar* nel 1827; ebbene questo ricovero fu trovato dallo stesso Hugi a circa 100 metri più in basso della sua posizione primitiva nel 1850; nel 1856 se ne era scostato di 714 metri; nel 1841 Agassiz la trovò a 1428 metri in basso dal luogo d'impianto; questo prova contemporaneamente il moto longitudinale del ghiacciaio, e il suo crescere in rapidità di mano in mano che si discende verso la vallata; difatti dal 1827 al 1850 il

moto fu in media di 33 metri all'anno, di 100 e più metri dal 1830 al 1836, e finalmente di 140 metri dal 1836 al 1841. Troppo lungo sarebbe l'accennare a tutti gli esperimenti fatti a questo riguardo in epoche diverse da Escher de la Linth, dapprima, da Agassiz, da Forbes, da Tyudall e da altri molti che si occuparono di tal fenomeno; mi limiterò a dare i risultati finali; e sono:

Che un ghiacciaio ha il suo massimo di moto progressivo longitudinale durante la primavera, il suo minimo nell'inverno; che il movimento di progressione è più rapido verso la linea mediana del ghiacciaio che non in corrispondenza delle linee laterali; che la velocità del movimento è in rapporto alla massa del ghiacciaio; che esso moto può rallentarsi, ma non cessare completamente; che è maggiore negli strati superficiali del ghiacciaio che non negli strati profondi.

Questi sono i più importanti risultati che emergono dalle numerose e minutissime osservazioni fatte da Agassiz sul ghiacciaio di Aar; altri fecero alla loro volta delle osservazioni, e giunsero pressochè ai medesimi risultati. È chiaro che non si può stabilire una media di movimento di progressione, la quale rimanga costante per tutti i ghiacciai e per tutte le annate; il diverso grado di temperatura e d'umidità atmosferica, la quantità varia di neve caduta, il differente spessore del ghiacciaio, l'essere esso semplice oppure costituito dal confluire di molti assieme, ed altre molte circostanze possono indurre variazioni notevolissime; riferisco qui alcuni dati numerici esprimenti i risultati delle varie osservazioni; per il ghiacciaio dell'Aar Hugli trovò una media di 240 piedi inglesi (di metri 67,80 circa), Agassiz trovò per l'istesso ghiacciaio la media annua di moto di 67 metri. Per il ghiacciaio detto il *Mare di ghiaccio* sopra Chamounix abbiamo la media annua dedotta da cinque osservatori diversi; Bakewell lo trovò di 146 metri, di 200 metri il signor De la Bèche, di 100 metri appena Shirwell, Rendu di 122 metri, Saussure di 125 metri; le grandi variazioni di queste misure fatte sul movimento longitudinale, quantunque in gran parte si debbano attribuire al diverso modo di misure, ed anche alla poca esattezza con cui si facevano, pure danno indizio dell'impossibilità di avere una media invariabile. I metodi di misure, semplici dapprima, si perfezionarono al punto di potere render conto del progredire di

un ghiacciaio per ogni giorno ed anche per ogni ora. Dapprima furono i grandi massi o *boulders* caduti sul ghiacciaio, che col loro variare di posizione rispetto a certi punti fissi davano conoscenza del moto longitudinale; ma giustamente si osservi che potevano nascere degli errori dal fatto che questi massi in molti casi rotolavano rapidamente, o non rimanevano realmente fissi alla superficie del ghiacciaio; furono in seguito adoperate delle palline disposte in linee trasversali e longitudinali che col loro incurvarsi, spostarsi e coll'allontanamento dei varii pali costituenti le linee di osservazione rendevano sensibile non solo il moto di progressione, ma eziandio il suo variare nelle diverse porzioni del ghiacciaio.

Per constatare fino al millimetro lo spostarsi delle palline furono applicati i traguardi; con tali mezzi Agassiz potè redigere quei minutissimi quadri ove riporta in cifre i fatti osservati per molti anni di seguito sul ghiacciaio dell'*Aar*; analogamente operò Forbes per il *Mer de glace*. Il massimo però di movimento non corrisponde precisamente alla linea mediana, anzi i punti ove esso si osserva segnano una linea serpeggiante che, andando da destra a sinistra e da sinistra a destra, incrocia a più riprese la mediana stessa.

2°) Varie spiegazioni furono emesse per il moto longitudinale dei ghiacciai. La più antica teoria a questo riguardo è quella di Scheuchzer, che modificata alquanto venne adottata da Charpentier, e per molto tempo fu universalmente accettata; essendo stata posta in obbligo questa teoria appena emessa da Scheuchzer da quelli che dopo lui si diedero a questo studio, quella che prima colpì l'attenzione degli scienziati fu la teoria di Gruner, secondo la quale il moto longitudinale sarebbe derivato da un vero scivolamento del ghiacciaio sul suo fondo, e ciò in forza di torrenti che ne avrebbero percorso l'alveo, le cui acque riuscivano a svincolare e sollevare dal fondo stesso il ghiacciaio, rendendo così più facile lo scivolamento.

Questa opinione venne anche adottata da De Saussure fino a che per sue particolari osservazioni vide essere inammissibile. Questa teoria considera il ghiacciaio come una massa rigida, ciò che in nessun modo si può ammettere, giacchè molteplici esperimenti dimostrarono a tutta evidenza la plasticità del ghiaccio, e l'essere

esso inzuppato d'acqua allo stato liquido; secondo essa, i ghiacciai a fondo più inclinato dovrebbero progredire più rapidamente, ma le osservazioni di Agassiz dimostrarono la nessuna influenza del pendio sul moto progressivo; con questa teoria i ghiacciai non potrebbero rimanere in posto, ma dovrebbero scivolare con una spaventevole rapidità, e precipitarsi non scendere verso le vallate sottostanti: difatti cosa potrebbe trattenere quelle moli enormi dotate di peso così stragrande ove esse, indipendenti dal loro fondo, potessero liberamente scivolare su di esso? I fautori di essa risposero che le estremità superiori erano aderenti al letto; ma l'aderenza non esclude già per sé qualunque probabilità di scivolamento? Sventuratamente talvolta le porzioni terminali inferiori dei ghiacciai, ove per circostanze speciali si trovino prive di appoggio, si staccano dal restante della massa e precipitano in basso, portando seco la distruzione dei pascoli e dei casali; il 27 dicembre 1819 dal ghiacciaio di *Randa* nel Vallese si staccò la porzione terminale e si rovesciò in un ghiacciaio sottostante; nel suo rovinare non giunse fino al villaggio di *Randa*, ma la commozione dell'aria circostante fu sì rapida e violenta, che molte case ne vennero abbattute; or bene, piuttostochè staccarsi la porzione terminale, sarebbe l'intero ghiacciaio di *Randa* scivolato in basso ove esso fosse stato indipendente dal fondo per opera d'un interposto strato acqueo, tanto più che la sua inclinazione è di oltre 50°.

Altra teoria emessa per ispiegare il moto progressivo dei ghiacciai è quella di Scheuchzer adottata da Charpentier; essa ricorre alla dilatazione dell'acqua di fusione degli strati superiori per un congelamento nelle fessure capillari del ghiaccio. L'acqua sarebbe in essa l'unico agente impellente; infatti, per mezzo di essa si spiegano i fatti osservati sul moto longitudinale. L'acqua infiltrandosi nelle fessure del ghiacciaio e congelandosi in seguito per abbassamenti esterni di temperatura si dilata, e dilatandosi agisce in tutti i sensi e con una forza immensa in tutta la massa di ghiaccio che la circonda; ma questa dilatazione non può tradursi in effetto nella direzione della verticale dall'alto al basso, e neppure longitudinalmente dalla porzione bassa alla parte elevata del ghiacciaio, perchè nel primo caso trova una resistenza nel fondo, nell'altro caso vi si oppongono i fianchi del picco da cui si stacca il ghiacciaio, il peso



delle sovra incombenti masse di ghiacciaio; da ciò essa non può rendersi sensibile che per un moto di discesa dall'alto al basso, e per un innalzamento di livello del ghiacciaio. Dove maggiore è la potenza della massa, maggiore colà è la quantità dell'acqua assorbita, maggior forza si determina nel congelamento, quindi più rapido il progredire. Nell'inverno la fusione superficiale è pressochè nulla, l'assorbimento d'acqua ridotto a minime proporzioni, ed ecco prodursi una specie di arresto nel procedere in discesa del ghiacciaio nella fredda stagione; più rapido si sviluppa il movimento nella primavera, perchè più forti e rapide le alternative di fusione e di congelazione. Charpentier e Biselx diedero troppa importanza alla congelazione dell'acqua nelle crepaccie; la crosta di ghiaccio che si può formare alla superficie dell'acqua rattenuta da crepaccie chiuse inferiormente esercita una forza minima in confronto della resistenza che offrono le pareti delle crepaccie stesse, d'altronde una gran parte di sua forza è perduta nella libertà in cui trovasi l'acqua di dilatarsi superiormente. Questa teoria della dilatazione per congelamento seduce per la sua semplicità, e venne per molto tempo adottata universalmente; ma è il suo fondamento che è falso; perchè essa potesse servire a spiegare il moto del ghiacciaio, bisognerebbe che giornalmente l'acqua penetrata nella massa sempre ed interamente fosse soggetta ad un abbassamento di temperatura tale da determinarne la congelazione; ora noi sappiamo benissimo dagli studi di Agassiz e di Desor sui ghiacciai dell'*Aar* e di *Strahleck*, che l'acqua nell'interno della massa di ghiaccio è costantemente ad una certa profondità a 0° gradi, per cui non può trovarsi in altro modo che allo stato liquido; e non arriva mai a congelarsi, tenendo anche conto per ciò della pressione a cui l'acqua è sottoposta e che si oppone anch'essa al suo congelamento. Pare quindi si debba adottare l'opinione di Agassiz, secondo la quale l'acqua sarebbe il primo agente nel moto di discesa per la plasticità che imparte al ghiacciaio interponendosi allo stato liquido, come già vedemmo, negli interstizi di cui è ricca la massa del ghiaccio, e nello stesso tempo per la forza che esercita dilatandosi nel congelamento a cui va soggetta negli strati superficiali, nei quali soli riesce sensibile ogni variare di temperatura esterna; ciò dà ragione del procedere più rapido di questi medesimi strati superficiali;

difatti in essi due forze concorrono a produrre il moto, quella di plasticità comune a tutte le parti del ghiacciaio nelle ore calde della giornata, quella della dilatazione dell'acqua nella notte. È condizione quindi essenziale che il freddo non possa giungere a compenetrare tutta la massa del ghiaccio, altrimenti l'acqua si congelerebbe totalmente, ed invece di progredire come una massa plastica, il ghiacciaio si arresterebbe irrigidito, e si verrebbe a questa conclusione tanto più vera, quanto più strana a primo colpo d'occhio, che cioè in tal caso il ghiacciaio si arresterebbe perchè si è congelato.

Agassiz attribuisce ancora un altro modo di agire all'acqua nel produrre il moto di discesa, cioè per il suo peso; quest'azione certamente non si può negare, ma si può benissimo dire che a petto delle altre è di poca importanza.

Forbes volle rendere il moto di discesa dei ghiacciai affatto indipendente dalle dilatazioni dell'acqua per congelamento, annuisce all'azione di essa per interposizione ai granuli del ghiaccio, ma non disse plastica la massa del ghiacciaio, bensì vischiosa; trattando delle proprietà fisiche, già feci menzione di questa denominazione data da Forbes; e credo basti quello che già esposi per far vedere che il ghiacciaio non si può considerare come una massa vischiosa, quindi rassomigliare il suo modo di procedere a quello delle lave, come volle fare Forbes.

3°) Coll'intervento dell'acqua allo stato liquido negli strati profondi, e solida a certi intervalli di tempo nei superficiali, si spiega eziandio il moto d'ascensione del ghiacciaio secondo una linea diretta verticalmente dalla faccia profonda alla superficiale. Questo movimento si traduce in un'elevazione del livello del ghiacciaio, per cui si può dire con tutta verità che esso ghiacciaio si gonfia, aumenta di volume. Nella continua fusione nuova acqua s'infiltra senza posa nella massa di ghiaccio, ed aggiungendosi alla preesistente, è chiaro che nell'aumentare il volume dell'acqua interposta tende ad allontanare sempre più gli uni dagli altri i granuli elementari; questo aumento di volume non può esercitarsi dall'alto in basso secondo la linea longitudinale, poichè la roccia da cui staccasi il ghiacciaio ed il peso delle masse di ghiaccio superiori lo vietano; dunque esso

non potrà produrre effetti sensibili se non innalzando il livello del ghiacciaio e cooperando alla discesa di esso; però non sempre s'innalza il livello, anzi in molti casi si abbassa; allora bisogna ricorrere per la spiegazione ad una preponderanza di ablazione; difatti nei periodi di maggior fusione non solo i ghiacciai si raccorciano, ma realmente si abbassano di livello. Oltre all'aumento di volume, per aggiunta di nuova acqua d'infiltrazione, bisogna anche considerare come causa dell'innalzamento del livello del ghiacciaio la dilatazione di quella infiltratasi e rimasta negli strati superiori suscettibili di congelamento sotto l'azione di abbassamenti esterni di temperatura. Anche questo moto nello spessore venne minutamente osservato e calcolato da Agassiz, e nella sua opera, *Système glaciaire*, sono riferiti i risultati delle sue esperienze.

4^o) Conseguenza del moto longitudinale del ghiacciaio è l'avanzarsi di esso nei pascoli per modo da giungere talvolta fin presso agli abitati; quando il lavoro della fusione prepondera sulle forze impellenti alla discesa, il ghiacciaio si ritira, caso osservato moltissime volte dai viaggiatori e dagli alpigiani. Però è falso che gli allungamenti ed i ritiri sieno soggetti a vicende determinate; essi dipendono unicamente dal variare delle condizioni di temperatura e di igrometricità atmosferiche. L'aumento di volume del ghiacciaio compensa nel senso dello spessore l'ablazione; ma questo aumento essendo tanto meno forte quanto più ci allontaniamo dalla linea mediana, perchè sempre meno potente diventa la massa di ghiaccio, ne viene che facilmente sui margini l'ablazione predomina sull'accrescimento di volume; da ciò necessariamente dovrebbe venire una rapida distruzione del ghiacciaio sui suoi margini. E ciò avverrebbe certamente ove il moto trasversale non portasse un compenso. Il moto trasversale, quello cioè che si opera secondo una linea che dalla porzione mediana del ghiacciaio va ai margini, venne osservato da Desor e Dolfus-Ausset, e consiste in un continuo portarsi delle masse di ghiaccio dal centro verso i margini, segnando in questo moto una linea obliqua; in forza di questo accumularsi di ghiacci sul margine ne viene un reale e sensibilissimo risalire del ghiacciaio sui fianchi che lo incassano. Noi possiamo renderci persuasi di questo movimento, se osserviamo una massa isolata, od

un palo infisso nel ghiacciaio, non nella linea mediana, ma in vicinanza di essa; se noi poniamo mente alla direzione che il masso o il palo segnano nel loro discendere col ghiacciaio vedremo che si allontanano sempre più dalla linea mediana, e finiranno per riescire dopo un certo tempo al margine del ghiacciaio; in corrispondenza poi del margine restano sollevati coll'innalzarsi del ghiaccio sui fianchi montuosi. Dalle misure di Agassiz i due movimenti, il longitudinale ed il trasversale, starebbero fra loro sul ghiacciaio dell'*Aar* come 18 a 10, cioè in 24 ore il primo sarebbe di 18 metri, di 10 il secondo. Le masse di ghiaccio sono spinte verso i margini ed innalzate su di essi in forza della maggior velocità di discesa da cui sono animate le masse costituenti le porzioni mediane del ghiacciaio.

Esaminando il modo di formarsi e di presentarsi questi varii movimenti nel ghiacciaio, noi troviamo una grande analogia coi movimenti da cui è animata una massa di acqua corrente sopra un pendio di non soverchia inclinazione. Nel ghiacciaio e nella corrente di acqua il massimo di movimento longitudinale si osserva nella porzione mediana ed in una linea serpeggiante che incontra in più punti consecutivi la linea mediana; le masse spinte dal loro peso tendono a concentrarsi tanto nella corrente di acqua come di ghiaccio nei punti di maggior pendio, che ordinariamente coincidono colla parte mediana dell'alveo; però nel discendere rapidamente dai lati verso il mezzo, facilmente acquistano una forza capace di farle risalire sulla sponda opposta a quella da cui provengono; quando avranno consumato nel risalire la forza soverchia di cui erano animate, tenderanno nuovamente verso la linea mediana, ma anche in questa seconda discesa acquisteranno una forza che non sarà interamente distrutta al giungere delle masse alla parte più bassa dell'alveo; quindi si ripete più volte di seguito questo risalire verso le sponde e ne risulta all'ultimo che la linea corrispondente al massimo di movimento non è la linea mediana. Anche nelle correnti di acque la maggior velocità della parte centrale spinge continuamente delle masse acquee verso i margini; con aumento di volume si innalza il livello analogamente a ciò che succede sui ghiacciai. Da ciò dovremo dedurre che il ghiacciaio si può considerare benissimo comportarsi in tutto e per tutto come una corrente d'acqua; ed in questi ultimi

tempi il signor Favre di Ginevra provò che là dove un ghiacciaio si espande in un ampio anfiteatro, si costituisce analogamente ai fiumi che si allargano in laghi ed in bacini estesi; cioè il moto si mantiene continuo verso la parte mediana del bacino, va diminuendo in rapidità dal centro verso i margini, al punto di essere quasi nulla in corrispondenza di essi. Favre chiamò questi bacini di ghiaccio analoghi ai bacini di acqua, *glacieres-lacs*, e considerò il ghiacciaio afferente e quello efferente come i rappresentanti delle correnti di acqua che prima si espandono in un bacino dando origine ad un lago, e in seguito si riconcentrano in una seconda ed escono dal lago stesso, come si può osservare nel Rodano alle sue entrate ed alla sua uscita al lago di Ginevra.

Vi fu ancora chi accennò ad un movimento di avvolgimento sopra se stesso del ghiacciaio, il quale combinato con quello di discesa avrebbe fatto sì che la superficie superiore sarebbe diventata profonda; questo moto è del tutto immaginario ed in contraddizione coi fatti constatati dall'osservazione.

Riassumendo adunque si ha che i ghiacciai si muovono in vari sensi: che il moto longitudinale di alto in basso è il più sviluppato ed il principale; che questo ed il verticale son dovuti all'acqua di fusione che s'infiltra nel ghiacciaio ed agisce come elemento lubrificante, nello stesso tempo dilatante per gli strati superiori. Il moto trasversale non è altro che una conseguenza del longitudinale.

Per ciascun ghiacciaio la media di rapidità varia poco da anno ad anno, e le sue variazioni sono dovute esclusivamente allo stato diverso dell'atmosfera; quindi se si conosce per un dato ghiacciaio la media annua di moto longitudinale, si potrà calcolare entro certi limiti di approssimazione il tempo che dovrà impiegare un masso caduto sulla superficie, oppure nelle crepaccio per giungere al piede del ghiacciaio, ad essere reietto per conseguenza dal ghiaccio; ed infatti questo calcolo approssimativo si può fare; approssimativo, dico, perchè le variazioni atmosferiche non si possono prevedere.

Ecco un fatto commovente che prova la possibilità di stabilire questo calcolo; nel 1820, nel mese d'agosto, una carovana di viaggiatori tentava la ardita e suprema cima del monte Bianco, avanzandosi imprudentemente sulla neve recentemente caduta su uno dei ghiacciai che discendono dalla sommità; essendosi una grand'esten-

sione di essa neve staccata dalla sottostante superficie di ghiaccio, e scivolando rapidamente al basso, la carovana ne fu trascinata, e nella vertiginosa, sfrenata velocità della discesa, parte di essa precipitò in un'enorme crepaccia e là finì miseramente i giorni. Forbes nel 1850 calcolò che dopo 35 o 40 anni dal giorno della catastrofe i resti dei viaggiatori periti nelle viscere del ghiacciaio avrebbero dovuto comparire reietti dal ghiaccio sulla morena frontale del *Glacier des Bossons*. Questa predizione colpì il signor Contlet, che miracolosamente era scampato alla catastrofe, lasciandovi però uno dei suoi più cari amici; egli aspettò con ansia si realizzasse la predizione di Forbes, e nel 1861 ai 15 di agosto, 41 anni dopo il giorno fatale, egli poté stringere ancora una volta la gelida mano dell'amico estinto, che riconobbe a qualche contrassegno rispettato dai ghiacci; e coi resti dell'amico furon reietti quelli dei viaggiatori e delle guide compagni di sventura.

5°) Ora esaminiamo alcuni fenomeni che riconoscono la loro causa prima nel moto del ghiacciaio. Primo si presenta il fatto di lacerazioni, vacuità che rendono discontinue la massa e la superficie dei ghiacciai. Di queste cavità le più importanti sono le lacerazioni superficiali; esse non mancano mai e prendono sempre un grande sviluppo; al maggior numero, alla maggior larghezza delle crepaccie è dovuto l'aspetto eminentemente pittoresco d'alcuni ghiacciai; l'importanza loro resta palese quando si consideri che le crepaccie sono per così dire documenti che svelano il modo di comportarsi della massa di ghiaccio nel suo procedere nella discesa; dalle crepaccie poi hanno pressochè sempre origine le altre cavità. Per chi ha da percorrere le regioni delle nevi perpetue le crepaccie costituiscono un serio pericolo, che non si può superare se non con grandi cautele ed una vigilante prudenza; molti viaggiatori trovano la morte in quei profondi baratri, dove prima aveano con tanta compiacenza ammirato gli splendidi e brillanti riflessi azzurri o verdastri, o la cristallina limpidezza del ghiaccio che ne forma le pareti. Saussure descrisse molto bene un pericolo da lui corso per una di queste crepaccie, ed è veramente tale da far rabbrivire chi è nel caso da calcolarne la portata, e può sembrare una esagerazione a quelli cui non sono famigliari i viaggi alpini. Delle crepaccie si conoscono

varie specie e si possono dividere in periferiche, longitudinali e trasversali. Le più numerose e caratteristiche sono le trasversali che Agassiz chiamò *mediane* e distinse in *mediane de la névé* e *mediane d'escarpement*. Queste crepaccie hanno una direzione pure perpendicolare a quella della maggior tensione, per conseguenza tagliano trasversalmente il ghiacciaio descrivendo una curva a convessità superiore; mi spiego sulla espressione *direzione perpendicolare a quella della maggior tensione*; il ghiacciaio nel suo moto di discesa è animato da maggior rapidità verso la sua parte mediana, quindi una serie di palline disposte in linea trasversale al ghiacciaio, dopo un certo tempo da rettilinea, essendo stati i varî elementi che la componevano animati da un moto crescente dai margini verso il centro, diventa curvilinea ed a concavità superiore. Questa disposizione evidentemente ci rappresenta la intensità della tensione che si esercita nelle varie porzioni del ghiacciaio comprese tra i due margini; ma quando una massa qualunque non può più ubbidire oltre un certo limite alla tensione, essa si rompe, e precisamente in direzione perpendicolare a quella della tensione; le crepaccie ci rappresentano le fratture della massa del ghiaccio occasionato da ciò che la sua plasticità è insufficiente perchè possa obbedire alla tensione che si esercita verso il basso; quindi la loro direzione deve essere perpendicolare a quella della tensione, cioè descrivere una curva o convessità in alto. Ciò per il momento in cui esse crepaccie si originano; ma formate che siano obbediranno alla legge dominante sul moto di progressione del ghiacciaio, quindi la loro parte mediana discenderà più rapidamente delle porzioni laterali al punto da lasciarle addietro, e dove le crepaccie mediane non andassero soggette ad obliterarsi finirebbero per trovarsi col loro apice al piede del ghiacciaio, mentre le loro porzioni laterali sarebbero ancora in alto, ed a poco a poco si trasformerebbero in crepaccie longitudinali, di cui dirò in seguito. Verso la parte superiore del ghiacciaio le crepaccie mediane o trasversali sono più regolari ed hanno generalmente una convessità superiore; verso la parte mediana esse descriverebbero una linea a tre curve, due laterali minori a convessità verso l'alto, una mediana maggiore a convessità in basso; al termine del ghiacciaio invece le due curve laterali verrebbero quasi a scomparire e solo sussisterebbe la mediana enormemente sviluppata. Chi studiò

con cura l'andamento delle crepaccie ebbe campo ad osservare la verità di questi fatti; ed Agassiz ci fornì su questo riguardo buonissimi studi corredati da fedeli disegni.

Le crepaccie periferiche son quelle che quasi sempre lacerano la massa o meglio la superficie del ghiacciaio in vicinanza delle rocce incassanti; esse sarebbero prodotte da una ineguaglianza di movimento fra la parte del ghiacciaio vicina alla roccia e quella che è ad immediato contatto; più celere nelle prime viene a svilupparsi una tensione non compatibile col grado di plasticità del ghiaccio, quindi una lacerazione; queste crepaccie chiamate col nome di *rimayes* da Agassiz tengono una linea di direzione le cui inflessioni sono nel più stretto rapporto colle accidentalità delle rocce su cui posa il ghiacciaio.

Le crepaccie mediane quando arrivano in un punto del tragitto ove il pendio del fondo è troppo forte si allargano enormemente, ed ove succedano dei movimenti laterali si piegano, si fratturano i muri di ghiaccio interposti, ed ecco formarsi delle aguglie, delle piramidi di ghiaccio che principalmente attirano per le loro forme bizzarre ed ardite, e la limpidezza cristallina di cui sono dotate, l'attenzione dei *touristes*. Quando questa soverchia inclinazione nel fondo del ghiacciaio succede in regioni più elevate ove il ghiaccio è dotato di maggior plasticità, non ancora è passato allo stato di rigidità in cui trovasi al piede dei ghiacciai, invece di piramidi o di aguglie, si formano dei blocchi di configurazioni regolarissime, ordinariamente a mo' di cubi, o parallelopipedi giganteschi chiamati *seracs* da Saussure. Dove il pendio diventa rapido sì che le varie porzioni di ghiacciaio staccate dalle crepaccie si trovano prive d'appoggio, esse rovinano in basso e danno origine a dei franamenti, o cascate di ghiaccio, per cui vanno celebri i ghiacciai del monte Bianco. Le crepaccie mediane sono originate anch'esse da una ineguaglianza di movimento nelle diverse porzioni della massa d'un ghiacciaio, per cui si produce una tensione superiore a quella che converrebbe al grado di plasticità, donde lacerazione.

Colle crepaccie periferiche vanno connessi i vani che talvolta s'incontrano alla porzione terminale superiore dei ghiacciai, là dove essi si staccano dalle rocce, prodotti in gran parte dal concentramento di calore in seguito di riverberazione dei raggi solari per

opera delle pareti sovraincombenti; questi vani di forma ellittica più ampia verso la parte loro profonda, si restringono superiormente formando vere caverne nel ghiaccio, e possono anche otturarsi completamente; Agassiz diede loro il nome di *caveaux*.

Le crepaccie longitudinali non sarebbero altro che i lembi superstiti d'una crepaccia mediana il cui apice arrivato al piede del ghiacciaio sia stato distrutto; questi lembi, antiche porzioni laterali delle crepaccie mediane, sono sempre respinti contro i margini, per il moto trasversale che vedemmo manifestarsi nei ghiacciai atteso alla maggiore velocità della parte mediana. Possono eziandio essere originate le crepaccie longitudinali da accidentalità delle rocce sottostanti al ghiacciaio, che influiscono nella direzione del suo movimento. Così secondo Charpentier: ma Agassiz avendo osservato come esse sieno ordinariamente più sviluppate in quei ghiacciai, che dopo aver attraversato una gola ristretta si spandono in un'ampia vallata e su larghe superficie, venne nell'idea che fossero prodotte dal riversarsi e dall'espandersi lateralmente dalla massa del ghiaccio; questa spiegazione serve per la maggior parte dei casi, senza però escludere totalmente quella data da Charpentier.

Agassiz parla ancora di un'altra specie di crepaccie che chiamò *marginali*, la cui esistenza è molto effimera; le denomina crepaccie marginali, e sono quegli spacchi che, partendo da uno sprone di roccia addentrantesi nel ghiacciaio, irradiano da esso senza però inoltrarsi troppo, e terminano in un angolo acutissimo a mo' di cuneo; esse si produrrebbero per l'influenza dell'ostacolo accennato sul corso del ghiacciaio, per cui verrebbe a determinarsi ineguaglianza di velocità nel movimento, quindi tensione seguita da lacerazione; esse sono ordinariamente rettilinee, talvolta anche a zig zag; ma presto si obliterano perchè si trovano perpendicolari al corso del ghiacciaio.

Dunque tutte le crepaccie si originano per effetto d'una tensione superiore alla plasticità del ghiacciaio. Charpentier attribuisce questa tensione ad ineguaglianza di dilatazione nella massa del ghiacciaio ed alla inclinazione del fondo su cui esso poggia.

Le crepaccie mediane si aprono repentinamente con una detonazione, che ripetuta dagli echi delle montagne rassomiglia molto ad un colpo di cannone; è preceduta l'apertura da un affioramento di bollicine gazoze, ed in caso di aprimento contemporaneo di molte

crepaccie una specie di fremito percorre la massa del ghiacciaio, rendendosi anche sensibile all'attento osservatore. Dapprima sono di piccola larghezza, ma in seguito l'acqua che vi penetra recando seco un certo grado di calore, i raggi solari, la calda temperatura diurna dell'atmosfera le allargano, e quando questi agenti si combinano con un rapido abbassamento di livello nel fondo possono le crepaccie mediane acquistare una larghezza anche di oltre 5 metri. Molto più si allargano le marginali di Agassiz, e le periferiche acquistano talvolta l'aspetto di veri baratri o caverne. Meno ampie sono le longitudinali, esse si dispongono ordinariamente a ventaglio nella parte inferiore espansa dei ghiacciai, disposizione che dà un aspetto singolare a quelle del Rodano.

Nei *caveaux*, ossia vacui, già mentovati in correlazione colle crepaccie periferiche, l'apertura può arrivare a 15 o 20 metri di larghezza su 500 di lunghezza e 50 ad 80 di profondità. Le crepaccie non giungono fino al fondo del ghiacciaio, però comunicano generalmente con esso per canali interni o piccole fessure. La profondità massima delle crepaccie mediane fino ad ora esplorate giunge a 260 metri. Le longitudinali e le marginali arrivano in certi casi al fondo del ghiacciaio.

Riguardo al chiudersi delle crepaccie si può dire in generale che è prodotto dal moto di discesa, e dal diminuire di pendio nel fondo; i margini avvicinandosi per la natura stessa del ghiacciaio si saldano e la crepaccia scompare; però anche chiusa essa lascia traccia di sé colle linee di detrito e di sabbia espulsi dalla medesima, che ne segnano fedelmente il posto occupato. Le longitudinali per loro natura difficilmente si chiudono, e le cagioni di oblitterazione che servivano per le altre crepaccie non tutte si possono implorare per la chiusura delle longitudinali.

Colle crepaccie non bisogna confondere i solchi tracciati nel ghiaccio dall'acqua di fusione non assorbita, principalmente nella parte inferiore dei ghiacciai; come pure non possono essere considerate come crepaccie certe depressioni ripiene di acqua che possono discendere anche ad una certa profondità; queste depressioni sono sempre molte allargate, poichè l'acqua accumulandosi scioglie continuamente una quantità di ghiaccio alla periferia. Le crepaccie chiuse che si riempiono d'acqua sono invece molto profonde e

poco ampie. Al primo caso si devono attribuire certi laghetti che s'incontrano frequentemente nei ghiacciai, là ove prostanto degli avvallamenti, se sono di piccola estensione prendono il nome di pozzette, per distinguerli dai veri pozzi originati dalle crepaccie. Quando una crepaccia si trova in un avvallamento del ghiacciaio facilmente assorbe i vari rivoli che nell'atto dell'ablazione ne solcano in gran numero la superficie: l'acqua di questi rivoli dotata d'un certo grado di temperatura allarga continuamente l'apertura delle crepaccie sciogliendo il ghiaccio delle pareti, e le dilata al punto da non potersi più rinchiudere anche in seguito all'obliteramento delle porzioni laterali; ed ecco formatasi una strada alle acque superficiali per discendere al fondo del ghiacciaio; queste cavità son quelle conosciute sotto le denominazioni di pozzi, vortici, *moulins*; esse, come dissi, sussistono anche dopo la scomparsa delle crepaccie da cui trassero origine, e vanno soggette al moto di progressione come provarono le osservazioni di Wild e di Agassiz.

Fra le cavità dei ghiacciai vanno annoverati quei vani interni resi palesi unicamente nelle operazioni di traforo o di sonda fatte da Agassiz sul ghiacciaio dell'Aar; e per ultimi prendono posto i canali per cui l'acqua assorbita dai *moulins* entra nello spessore del ghiacciaio e che la conducono al fondo di esso.

Ciò che contribuisce a rendere pericolose le crepaccie è il formarsi per adesione una crosta di neve che ne maschera l'apertura; crosta di neve che nel maggior numero dei casi non è atta a sorreggere il peso di una persona; quindi grande prudenza ci vuole nell'attraversare i ghiacciai, e conviene tener conto delle striscie più bianche di neve recente, sotto le quali ordinariamente è aperto l'abisso, sondar continuamente la superficie del ghiacciaio col bastone ferrato o *alpenstock*, prima di avventurare il passo.

Il signor Hugi stabilì una divisione delle crepaccie in quelle di notte o d'inverno, e quelle di giorno o d'estate; la configurazione di esse sarebbe diversa; per quella di giorno sarebbe analoga ad un cuneo coll'apice in basso e la base in alto, aspetto ordinario delle crepaccie; inversamente sarebbe per quelle di notte che partirebbero dal fondo del ghiacciaio; l'osservazione non ha ancora comprovata l'asserzione di Hugi.

6°) Gli agenti atmosferici operano potentemente nelle regioni montuose, e quantunque la loro azione si eserciti sopra materiali più d'ogni altro resistenti, pure la denudazione ha luogo su ampia scala. L'acqua infiltrandosi nelle fessure delle rocce, e dilatandosi col successivo congelamento ne stacca dei blocchi enormi, che rovinando con spaventevole rapidità sui fianchi scoscesi, altri ne staccano e tutti alla rinfusa finiscono per giungere alla superficie del ghiacciaio, ove si arrestano senza approfondarsi se cadono sul ghiaccio compatto, ovvero si seppelliscono sotto gli strati più superficiali ove incontrino della neve recentemente ed in gran copia caduta, non ancora trasformata in ghiaccio. Se le pareti sovrastanti al ghiacciaio sono fortemente inclinate e la superficie di esse è poco convessa, i materiali di denudazione si disperdono sulla superficie; se invece meno scoscesi sono i fianchi montuosi, o più convesso il ghiacciaio, essi si arrestano al suo margine e costituiscono degli accumuli di materiali incoerenti, di mole svariatissima, riposanti in parte sul ghiacciaio, in parte sulla roccia incassante: nel primo caso i massi ed i detriti sparsi irregolarmente sulla superficie finiscono per portarsi anche loro sui margini in forza del movimento trasversale che anima le masse di ghiaccio per cui tendono ad allontanarsi dalla linea mediana.

Questi depositi fiancheggianti il ghiacciaio in conseguenza del moto longitudinale si allineano in collinette laterali che presero il nome di morene laterali. Per ogni ghiacciaio esse saranno evidentemente due, una di destra, l'altra di sinistra, ed i loro elementi saranno identici con quelli delle rocce delle montagne da cui provengono, ed il loro sviluppo in rapporto coll'altezza e la mole dei fianchi e dei picchi da cui trassero origine.

Si considerò come una favola l'asserzione emessa da alcuni che il ghiacciaio rifiuti i materiali eterogenei, e se ad essa non si prestò gran fede egli è perchè si attribuiva questo fatto ad un'azione intrinseca, quasi molecolare del ghiaccio. Ciò però è stato osservato e dimostrato. Nelle regioni elevate del ghiacciaio, dove la neve è ancora incoerente e disaggregata, i massi che precipitano dalle vette circostanti vi si approfondano e seppelliscono; colà non esistono ancora morene: ma di mano in mano che si discende verso la regione del ghiaccio compatto, questi massi vengono alla superficie e

ciò per due ragioni; in prima per l'ablazione che distrugge continuamente lo strato più superficiale, per cui quello contenente inclusi i massi finirà per essere alla sua volta superficiale; secondariamente l'acqua di fusione colando al di sotto di essi massi vi si accumula, e congelandosi in seguito si dilata, e la sua dilatazione non potendo esercitarsi dall'alto in basso per la resistenza che oppone il ghiacciaio, agisce invece dal basso in alto, e precisamente sollevando questi massi che le sovrastano. Combinando il moto più volte ripetute verticale di ascensione di questi massi, col loro moto longitudinale di discesa in un col ghiacciaio, facilmente si comprende come essi non vengono ad emergere là ove caddero, ma bensì nel punto della superficie del ghiacciaio che è sulla diagonale del parallelogrammo costruito sulle forze da cui essi sono contemporaneamente sollecitati.

Per i massi che precipitano nelle crepacce è più difficile questo moto d'ascensione, ma avviene però collo stesso meccanismo.

I materiali di morene, come è facile concepire, risultano di detriti o frammenti di rocce d'ogni grossezza, però sempre angolari ed a spigoli taglienti; le rocce più dure, come il granito, il serpentino, la diorite, son quelle che danno gli elementi più voluminosi; le rocce schistose e più friabili si riducono facilmente in tenui frammenti. Nel continuo moto di discesa questi diversi elementi della morena si spostano continuamente, quindi il loro sfacelo si rende più facile per il mutuo confricarsi; però tendono ad arrotondarsi, ma prima di giungere allo stato di ciottoli rotondi nuova frattura li riconducono a riavere spigoli taglienti e forme angolose. Dal confricarsi fra loro e colle rocce ne nascono ancora le strie ed i solchi caratteristici dei ciottoli di ghiacciaio.

Nelle morene laterali i frammenti presi tra le pareti di roccia e la massa del ghiaccio, vengono triturati e ridotti in una polvere finissima, che impastata coll'acqua di fusione, dà il così detto fango di ghiacciaio, il quale mescolato coi massi morenici è documento là dove s'incontra dell'esistenza di ghiacciai antichi. Ciò per le morene laterali le quali possono assumere configurazione svariata a seconda della convessità o concavità del ghiacciaio, della ripidità maggiore o minore dei fianchi su cui esso posa. Quando due ghiacciai s'incontrano e si confondono è naturale che le morene

di destra o sinistra dell'una debba trovarsi a contatto con quella di sinistra o di destra dell'altra; e difatti le due morene disgiunte per un certo tratto sulla superficie dei ghiacciai riuniti tendono a colmare il solco interposto, e finiscono per confondersi e dar luogo ad una sola morena che corre per il mezzo dell'unico ghiacciaio costituitosi, e prende perciò il nome di morena mediana o superficiale, secondo Charpentier. Se questo ghiacciaio risultante di due che si sono fusi assieme, ne incontra un altro, una sua morena laterale si unisce colla laterale dell'altro ghiacciaio, e quindi se ne avrà uno complessivo con due morene mediane; se il formarsi delle morene mediane, ed il procedere dei ghiacciai fosse sempre così regolare, è chiaro che dal numero delle morene mediane di un grande ghiacciaio si potrebbe dedurre il numero dei singoli ghiacciai che hanno contribuito a formarlo. La morena mediana appena formata sta in una specie di solco, ma col progredire in basso si solleva, ed impedendo colla sua azione protettrice la fusione del ghiaccio sottostante, mentre essa si opera attivamente su tutto il restante scoperto della superficie, si forma un piedistallo, che ne porta la base ad un livello più alto di quello del ghiacciaio stesso; ma per natura stessa dei materiali morenici, questi tendono continuamente a smuoversi e rotolare, quindi appena il piedistallo soverchiamente innalzato presenterà attacco all'azione distruggitrice dei raggi solari, i massi non avendo più una base ampia e solida si porteranno in basso lateralmente, ed arriveranno a disporsi lateralmente sul vero livello del ghiacciaio; questa formazione e distruzione del piedistallo morenico si ripete indefinitamente. Quando si giunge ad una cascata, cioè in un punto dove per la forte inclinazione del fondo le crepacce si allargano enormemente e si fratturano in piramidi i muri di ghiaccio che le limitano, la morena mediana si precipita in quei baratri beanti e scompare; ma quando il ghiacciaio ha oltrepassate le cascate e si trova in un pendio più dolce, le crepacce si chiudono, la superficie si fa nuovamente regolare, gli elementi della morena mediana reietti dalla massa del ghiacciaio rimontano alla superficie ricostituendosi poco alla volta in morena ove il ghiacciaio sia sufficientemente esteso. Non però la morena riprenderà la sua mole e forma primitiva; essa sarà più depressa, ed una parte dei suoi

materiali, dispersa lungi dalla linea mediana, ubbidirà al moto trasversale, e si recherà ad ingrossare le morene laterali.

Si credettero dovute al moto trasversale certe striscie di detrito e sabbia che partono dalla morena mediana e la congiungono alla laterale; però, se così fossero originate certe linee di sabbia, dovrebbero essere disposte semplicemente in direzione obliqua discendente tra la morena mediana e la laterale; invece staccandosi dalla prima formano un arco più o meno allungato e risalgono contro la direzione del moto di discesa per giungere ai margini; dirò in un altro capitolo come si possa spiegare l'origine delle striscie sporche, o *bandes sales* dei francesi, *dirt-bands* degli inglesi.

Fra le morene mediane e le laterali esistono talvolta ammassi isolati che, coll'avanzarsi del ghiacciaio, si dispongono linearmente in modo da far credere all'esistenza d'un'altra morena mediana; esse provengono da grandi frane che per il rapidissimo declivio furono spinte oltre il margine del ghiacciaio e lì si arrestarono senza giungere però sino alla morena mediana. Queste false morene si distruggono poco alla volta ed i loro elementi gradatamente si trasportano per il moto trasversale alle morene laterali; l'osservazione dei *dirt-bands* può metterci in guardia contro gli errori che potrebbero derivare dall'esistenza di queste morene avventizie; le morene mediane posano sempre sul punto d'unione dei due *dirt-bands*; la falsa morena sempre ricuopre l'arco di ciascun *dirt-band*; ciò emergerà più chiaro nella esposizione del come si originano e si dispongono queste striscie di sabbia sui ghiacciai complessi.

Al termine del ghiacciaio per il restringere del medesimo, e per lo allargamento delle morene mediane e laterali, esse vengono a confondersi e dare luogo ad un deposito superficiale che cuopre indistintamente tutta la porzione terminale del ghiacciaio. Questo o rimane stazionario per lungo tempo, ed allora il deposito superficiale si accumula al piede di esso in una elevazione che prende un grande sviluppo e denominasi morena frontale o terminale; ovvero il ghiacciaio si ritira e nel ritirarsi abbandona i materiali che trasportano su una larga superficie del fondo rimasto scoperto e senza formazione di accumulamenti ragguardevoli, ed allora abbiamo la vera morena superficiale, il deposito glaciale disperso. È chiaro che la morena frontale, risultando formata dei materiali di

tutte le altre morene, sarà molto voluminosa. Essa può essere multipla, costituita come da diverse morene addossate le une alle altre, confuse per la base, isolate per le creste; quindi un allineamento di elevazioni parallele che appartengono ad altrettante morene frontali corrispondenti a diversi periodi di arresto del ghiacciaio stesso.

Il ghiacciaio, colla pressione enorme che esercita sulle rocce sottostanti, ne distrugge i rialzi, le creste, ne stacca delle porzioni che riduce in frammenti minutissimi, i quali, impastati coll'acqua di fusione, danno una mota finissima, che trascinata dal ghiacciaio nel suo strisciare verso il basso giunge al piede di esso e costituisce dei depositi allineati parallelamente alle morene frontali, interni sempre rispetto ad esse, e sottostante ai depositi glaciali dispersi, quando il ghiaccio non può dar luogo alla formazione di morene frontali; questi depositi costituiscono la così detta morena profonda.

Lo studio delle morene è d'una grande importanza per il geologo; e vedremo in seguito come col confronto di alcuni depositi superficiali allo sbocco delle grandi vallate nelle pianure, colle morene in via di formazione, si sia potuto stabilire l'estensione di ghiacciai antichissimi.

Ai fenomeni prodotti dai massi di roccia caduti sulla superficie dei ghiacciai si rannoda quello delle tavole o funghi di ghiacciaio. Quando un frammento di mole ragguardevole si tiene isolato sulla superficie, impedisce la fusione della sottostante porzione di ghiaccio, e a poco a poco si forma, analogamente alle morene mediane, un piedistallo che lo sorregge ed innalza a qualche piede sopra il livello del ghiacciaio; giunto ad una certa altezza, finisce questo sopporto per trovarsi esposto all'azione struggitrice dei raggi solari, epperò si assottiglia fino a che, inabile a reggere il masso sovraincombente, si rompe e il *boulder*, che con tal nome vengon distinti questi massi isolati, rotola e scivola per un certo tratto finchè trovi condizioni favorevoli al suo arresto, e là si ripete lo stesso fatto, e si rinnoverebbe indefinitamente, se il *boulder* non arrivasse al termine del ghiacciaio, e là concorresse alla formazione delle morene frontali. Se il masso sorretto da questi piedistalli è tondeggiante, prende il nome di fungo dalla sua configurazione; di tavola invece se è costituita da un frammento di roccia conformata a lastre di maggiore o minore spessore.

Nel caso di una tavola del ghiacciaio il fenomeno presenta un'altra circostanza non meno strana ed importante; il calore dei raggi solari per l'intermedio della tavola arriva a fondere alquanto il ghiaccio sottostante del piedistallo, e la fusione si opererà naturalmente in maggior quantità da quel lato su cui dardeggian direttamente i raggi solari; ne verrà una inclinazione delle tavole dello stesso lato; ma il sole lungo la giornata muta posizione, quindi la maggior attività di fusione si trasporta sempre in corrispondenza del lato cui arrivano direttamente i raggi solari; da ciò l'inclinazione della tavola che era dapprima verso levante, sarà in seguito a mezzogiorno, a sera nelle ultime ore della giornata; quindi queste tavole del ghiacciaio si possono in certo qual modo paragonare ad altrettanti eliostati.

Prima di lasciare l'argomento dei depositi glaciali, conviene osservare che quando un torrente discendendo da un vallone in direzione perpendicolare a quella del ghiacciaio in modo da incontrarlo, esso ne corrode i margini, si forma una specie di cavità che si riempie dell'acqua stessa del torrente e di quella proveniente dalla fusione del ghiacciaio; in tal caso la morena laterale corrispondente trovando una cavità vi si precipita, ed essendo questa cavità ripiena di acqua, il deporsi dei materiali morenici sul suo fondo si fa con ritardo bastante a dare una certa regolarità al deposito, per cui noi abbiamo in tal caso un fatto di stratificazione del materiale glaciale reso più evidente quando il rio nelle sue piene trasporterà una quantità di ciottoli arrotondati e non striati, i quali formeranno strati alternati e distinti dai morenici. Questo modo particolare di presentarsi dei depositi glaciali ebbe da Charpentier la denominazione di *alluvione glaciale*.

7^a) Fra i fenomeni che riconoscono la loro causa nel movimento glaciale è l'azione che il ghiacciaio esercita sulle rocce sottostanti; è facile il concepire come questa azione debba essere abbastanza imponente, se si considera il peso enorme del ghiacciaio che è in movimento; e per conseguenza la pressione immensa che si sviluppa. L'azione però non si esercita direttamente dal ghiaccio sulle rocce; ognuno può ben rendersi conto che essendo il ghiaccio di una durezza minore a quella di qualunque roccia non arriverebbe mai per sè sola ad intaccarle.

Le roccie sottostanti al ghiacciaio sono paragonate da alcuni autori alle lastre metalliche ripulite dallo smeriglio; le lastre sono rappresentate dalle rocce, la forza è esercitata dal ghiacciaio, e lo smeriglio è in questo caso la mota e la fanghiglia che sta tra il ghiaccio e le rocce. Ed è naturale che essendo questa mota costituita di elementi minerali pari o superiori in durezza a quelli delle rocce medesime, queste finiscono per essere corrose, limate, e perdendo poco alla volta le loro scabrosità venire ad assumere un pulimento più o meno perfetto. Quando l'azione del ghiacciaio si esercita su rocce molli, maggiore quantità di essa viene asportata, ma il pulimento è molto meno perfetto. Le rocce dure a grana fina, come il serpentino, la diorite, son quelle che ricevono il più bel pulimento. Risulta dalle esperienze fatte all'uopo, che una roccia può benissimo intaccarne un'altra di ugual durezza; in tal caso la quistione si riduce alla pressione ed alla velocità. Alcuni obbietano che l'esistenza di rocce lisce e pulimentate potrebbe attribuirsi benissimo all'azione d'acqua o di terreni fangosi; l'azione dell'acqua si manifesta nella parte più profonda delle vallate, non sui fianchi montuosi alle elevazioni a cui si osservano rocce pulimentate; inoltre meno regolare è la pulimentazione che si compie per opera dei torrenti; vi ha poi un altro carattere che distingue le rocce lisce dal ghiaccio da quelle che lo furono sotto l'azione delle acque, e sono i solchi e le strie; i ciottoli inclusi nella massa del ghiaccio agivano come burino sulle rocce e davano luogo sotto la pressione enorme del ghiacciaio, resa anche più efficace dal moto stesso, a striscie tanto più nette e fine quanto più dure e compatte erano le rocce stesse; nel caso di lisciatura per mezzo delle acque non si incontrano mai nè strie, nè solchi. I torrenti fangosi contenenti dei ciottoli non possono dare strie così regolari, ma delle intaccature tutto al più sparse in modo irregolarissimo. Il ghiacciaio quando striscia su un letto di roccia stratificato verticalmente a strati di diversa durezza, intacca più facilmente alcuni di essi a preferenza di altri, e dà luogo a solchi analoghi a quelli dell'aratro; l'acqua dei torrenti scava dei solchi, ma flessuosi, contorti, mentrechè quelli segnati dai ghiacciai sono rettilinei e regolari. Il ghiacciaio colla sua azione sulle pareti e nel fondo di rocce le contrassegna con strie caratteristiche, l'acqua invece cancella le strie. La direzione delle striature è nel senso del movimento cioè in

quello della vallata, e sui fianchi talvolta si osservano incontrarsi in angoli acutissimi; ciò proviene da variazioni di estensione nel ghiacciaio; difatti, se questo è più esteso, la direzione del suo movimento si avvicinerà più alla orizzontalità; le strie saranno parallele alla direzione stessa; se viene a diminuire, il moto si opera con una maggiore inclinazione, epperò delle nuove strie che incontrano le prime ad angoli più o meno acuti.

Se da un ampio circo le masse di ghiaccio s' impegnano in una gola stretta, il livello del ghiacciaio si innalza, il movimento si fa più rapido, e le strie prendono una direzione obliqua dal basso in alto, e si fanno più profonde; oltrepassato lo stretto, se il ghiacciaio si allarga nuovamente, le strie assumono una direzione inversa; invece di risalire, discendono.

Le strie verticali che si osservano in certi casi sono i documenti d'un grande sviluppo di movimento verticale nel ghiacciaio.

Se il fondo è costituito da rocce molto dure ed accidentate, il ghiacciaio non riesce a livellarle completamente, ma dà luogo ad una serie di rialzi tondeggianti chiamati *rocce montoni* o *roches moutonnées*. I ciottoli stessi che sono trasportati dal ghiacciaio, confricandosi fra di loro, si puliscono e si striano; i ciottoli striati, le rocce pulite, le pareti lisce, pulimentate, rigate, sono i fossili del ghiacciaio, perchè là ove esistono, quantunque lontanissimi dalle regioni glaciali, indicano assieme colle morene e cogli avanzi di deposito caratteristici l'esistenza di ghiacciai antichi che coprivano quelle regioni, per modo che colla loro presenza si poterono tracciare e descrivere i ghiacciai che un tempo occuparono le grandi vallate alpine e giunsero col loro piede inferiore fino alle pianure svizzere ed alla valle del Po.

Saussure avea osservato queste strie, queste rocce pulimentate, ma avea tutto attribuito all'azione delle acque; Charpentier fu il primo ad occuparsene ed a scuoprirne l'origine.

Talvolta le rocce pulimentate presentano delle tracce biancastre e non strie nè solchi; ciò accade quando il ciottolo che si trovava compresso contro la roccia del ghiacciaio non era abbastanza duro e tenace da intaccarle, per modo che esso stesso si frantumava ed i suoi frammenti coi loro spigoli taglienti riuscivano ad impiantarsi nella roccia, e facevano, mediante la loro forma speciale, ciò che non

avea potuto operare il ciottolo più voluminoso ed arrotondato, e là rimanevano infissi malgrado gli agenti esterni e le cause distruggitrici.

I torrenti che circolano sotto i ghiacciai anch'essi modificano più o meno il fondo, e le loro tracce sono identiche a quelle che lasciano i corsi di acqua. I rivoli d'acqua di fusione, che per i pozzi si precipitano nel ghiacciaio, e giungono a cadere sul fondo in cascatelle e doccie, se le rocce che la costituiscono facilmente si lasciano intaccare, formeranno delle depressioni leggermente inclinate verso il basso della vallata; nella Svizzera francese i solchi e le depressioni che s'incontrano, principalmente nella valle del Rodano, per tal modo originati, prendono il nome di *Lapiaz*, e di *Kaider* nella Svizzera tedesca.

Queste tracce caratteristiche dei ghiacciai che ne svelano l'azione potentissima sulle pareti e sul fondo, difficilmente possono studiarsi là ove si formano attualmente; ma nelle regioni altre volte occupate dai ghiacciai là sono evidentissime, e chi vuol osservarle minutamente onde essere in caso di stabilire poi dei confronti, conviene si adatti a studiarle nelle sovraccennate regioni.

Capitolo III

Stratificazione del ghiaccio — Striscie di fango o sporche — Opinione di Forbes — Modo di presentarsi nei Ghiacciai semplici e complessi — Striscie azzurre e struttura venata del Ghiacciaio — Errori cui si può andare incontro — Fondo di un Ghiacciaio — Aderenza — Configurazione — Torrenti che sgorgano dai Ghiacciai.

1°) Tutti coloro che fecero delle indagini sui ghiacciai ammisero ad unanimità la stratificazione delle nevi dell'alta nevata che alimenta il ghiacciaio; tutti concorrono nello stabilire l'orizzontalità degli strati, e nel considerarli come rappresentanti la quantità di neve residua annuale; per cui il loro spessore starebbe in rapporto colla neve caduta durante l'annata, e per conseguenza sarebbe varia nei varii strati. Ma non fu che dopo molte e molte osservazioni accurate di Desor ed Agassiz che si arrivò a stabilire che la stratificazione sussiste per tutto il ghiacciaio, sino alla sua porzione terminale. Charpentier e Forbes negarono ricisamente questa sussistenza. Vediamo quali sieno i dati su cui fondandosi Agassiz stabilì la stratificazione in tutto il corso del ghiacciaio. La abbagliante candidezza dei ghiacciai è interrotta solo dalle morene mediane, ed offuscata sempre da piccole ombreggiature sinuose trasversali, o arcuate coll'apice delle convessità in basso, ossia longitudinali in linea obliqua, discendente dai margini alle morene mediane; esse sono date da piccole striscie di sabbia e fanghiglia che corrispondono agli affioramenti degli strati di ghiaccio, e ciò è comprovato dal trovarsi queste striscie in solchi frapposti a rilievi di ghiaccio più compatto che non sarebbero altro che le testate degli strati. Forbes, spiegando diversamente l'origine di queste striscie fangose, le chiama *dirt-bands* o *bandes sales* dei francesi. Da ognuno di questi rilievi delle superficie del ghiacciaio corrispondenti alle striscie di fango parte una lastra di ghiaccio molto più compatta, che attraversa il ghiacciaio in

tutto il suo spessore, come risulta dalle osservazioni di Agassiz, e nelle regioni sottostanti alle alte nevate queste lastre sono pressochè verticali. Charpentier, esaminando la massa del ghiacciaio, probabilmente fece le sue osservazioni là ove una di queste lastre verticali presentava una sua faccia perfettamente scoperta, ed allora egli ne dedusse che il ghiacciaio è uguale in compattezza nelle regioni superficiali e profonde.

Questi affioramenti inoltre, in gran parte dell'anno ricoperti dalla neve, difficilmente si presentano in maniera da poter esser osservati con abbastanza diligenza, e fa d'uopo ripetere le osservazioni anni ed anni, come fece Agassiz sul ghiacciaio dell'Aar. Una delle difficoltà che presenta lo studio della stratificazione del ghiacciaio è il grande variare di modo di presentarsi nel loro andamento di questi affioramenti. Verso la parte elevata sotto l'alta nevata essi disegnano una linea trasversale appena incurvata nel suo mezzo, ma discendendo in basso l'incurvatura si fa più forte per la solita causa della maggiore rapidità di movimento nella parte mediana, finchè può giungere ad un tal grado che, ove si troncasse l'angolo acutissimo dell'apice, non rimarrebbero che degli affioramenti longitudinali, e difatti in molti ghiacciai si presentano con questa disposizione. Quando un ghiacciaio di minor mole ne incontra un altro molto superiore in potenza, i loro ghiacci non si fondono immediatamente insieme, ma il minore si dispone lateralmente al maggiore e discende di conserva in basso nel comune letto, mentre le morene laterali si fondano in una mediana; ma allora è chiaro che il ghiacciaio di minor mole sarà fortemente compresso dal maggiore contro i fianchi della valle, e l'allungamento degli archi di affioramento si fa così esagerato che prendono una vera disposizione longitudinale; ciò può anche succedere quando un ghiacciaio è obbligato a traversare un passaggio angusto, ed ecco come da trasversali gli affioramenti possono disporsi longitudinalmente. La disposizione in cui si trovano talvolta è di un addentellato, come sul ghiacciaio di *Lauteraar*, ed allora ciò proviene da diversità nella rapidità del movimento per le varie porzioni del ghiacciaio in causa di accidentalità nel fondo. Nei ghiacciai risultanti dalla fusione di molti pressochè uguali in potenza si avranno tanti sistemi simili di affioramento che riuniranno con striscie fangose più o meno arenate le morene mediane tra loro e colle laterali;

se i ghiacciai riunitisi saranno disuguali in potenza, ogni sistema di affioramento prenderà una disposizione relativa alla potenza del ghiacciaio cui appartiene, considerata rispettivamente a quella degli altri con cui procede di conserva.

La stratificazione nei ghiacciai non è interrotta, salvo che nel caso di una soluzione di continuità, come nelle cascate; allora si ripristina, appena le varie porzioni infrante di ghiaccio si risaldano; ma in tal caso gli strati nuovi formati rappresentano la quantità di ghiaccio rovinata in basso per ogni parziale caduta, mentrechè gli strati primitivi erano i rappresentanti della quantità annuale di neve residua dalla fusione.

Oltre alle varie direzioni che prendono questi strati, direzioni svelate dagli affioramenti in rilievo, e meglio dalle interposte striscie fangose, havvi anche a considerare il vario grado d'inclinazione che possono gli strati presentar nelle varie regioni del ghiacciaio, e come si possa originare questo variare d'inclinazione. Gli strati dapprima orizzontali nella parte più elevata del ghiacciaio, discendendo verso il basso riescono, passando per varii gradi d'inclinazione, sino da essere pressochè verticali nella parte mediana, e continuando verso il basso, si avvicinano nuovamente alla linea orizzontale sino a non avere più che 10° gradi sulla medesima, inclinando verso la parte superiore del ghiacciaio; cosicchè pare che nel moto di discesa gli strati dall'estremità superiore alla parte mediana del ghiacciaio siano animati da maggior velocità nella porzione loro profonda, e che l'inverso succeda dalla parte mediana del ghiacciaio al piede di esso.

Il variare d'inclinazione è dipendente da una quantità di circostanze di cui alcune sono principali, altre puramente accidentali, quali sono il restringersi delle vallate percorse del ghiacciaio, l'incontro di due o più ghiacciai, le accidentalità delle rocce sottostanti, gli sproni delle montagne che si addentrano nel ghiaccio, e molte altre che è inutile accennare diffusamente.

Causa principale dell'avvicinarsi alla linea orizzontale degli strati di ghiaccio a partire dalle mediane regioni e procedendo verso il piede è certamente il rallentamento per maggiore attrito sul fondo della porzione profonda di ciascun strato; la superficiale animata da un moto più celere si abbassa. Ma più difficile riesce lo spiegare il raddrizzamento degli strati orizzontali procedendo dall'origine del

ghiacciaio verso la sua parte mediana; è questo un fatto costante, quindi non può avere la sua spiegazione in cause accidentali; Agassiz ammette che, nel cessare la fusione alla superficie del ghiaccio, la parte profonda degli strati sia maggiormente imbevuta di acqua liquida che non la parte superficiale, epperò avrebbe un grado di plasticità maggiore che non la seconda; ora la plasticità è condizione essenziale alla rapidità del movimento, naturale quindi che più attivo riesca nella parte più profonda degli strati; questa spiegazione non è ancor comprovata da fatti che non ammettano dubbio di sorta. L'inclinazione varia poi costantemente nello stesso strato andando da un margine all'altro del ghiacciaio, e in tesi generale si può dire che le porzioni laterali degli archi di affioramento sono meno inclinate che non il suo apice. Ciò che dissi riguardo alla inclinazione degli strati si riferisce principalmente a quelli i cui affioramenti descrivono archi trasversali alla direzione del ghiacciaio.

Per quelli ad affioramenti longitudinali le pressioni laterali per opera di altri ghiacciai, o delle pareti di roccia, son quelle che più influiscono nel variare d'inclinazione; questo è poi sempre verso il mezzo della vallata.

Lo spessore degli strati è diverso secondo la quantità di neve che cade annualmente sul ghiaccio, non tenendo conto della stratificazione che si forma al piede della cascata, che non è altro che un nuovo assettamento dei ghiacci rovinati. Agassiz ne osservò dello spessore di più di 2^m,50. Le distanze delle striscie d'affioramento, dei *dirt-bands* di Forbes è varia secondo l'inclinazione dello strato e non dà norma dello spessore d'esso; s'intende chiaramente che quanto più sono inclinati gli strati tanto maggiore sarà la distanza tra striscia e striscia; anzi non serve tal distanza a misurare lo spessore dello strato, altro che nel caso di verticalità.

Forbes e Charpentier consideravano le soluzioni di continuità attribuite da Agassiz agli interstizi di stratificazione, a piani di fratture per ineguali dilatazioni nella massa del ghiacciaio, cioè darebbero loro la stessa origine delle crepaccio; ciò potrebbe stare in certi casi per i piani di discontinuità longitudinale, ma non per i trasversali; ma provato che i primi non sono altro che i secondi modificati, non regge la teoria di Forbes nemmeno per essi; per osservare questi piani di frattura bisognerebbe che la massa del

ghiaccio fosse rigida, ma ciò è provato non essere ammissibile. Inoltre Forbes spiega per sole infiltrazioni d'acqua fra i piani di rottura le striscie di fango, e ne confonde l'origine con quelle delle zone di ghiaccio e *bandes bleues*, di cui dirò in seguito; ciò sarebbe possibile se le striscie di fango esistessero solamente colà dove esistono le zone di ghiaccio; dunque diversa ne è l'origine. D'altronde gli strati del ghiaccio sono in molti siti pieghettati come certi schisti tegolari; ora come può essere compatibile questa disposizione con una rottura violenta quale dovrebbe essere secondo Forbes?

Riassumendo adunque, avremo che i ghiacciai sono stratificati; che i loro strati non sono che quelli dell'alta nevata, che si comportano come se costituiti da rocce pieghevoli sotto la pressione; che le striscie di fango, o *dirt-bands*, ne sono i segnali di affioramento. Si può aggiungere che gl'interstizi fra strati e strati sono le vie principali per cui l'acque di fusione s'infiltrano nella massa del ghiacciaio.

2°) Un fenomeno di cui conviene far menzione è quello delle zone di ghiaccio, o bande azzurre dei francesi; queste zone costituite da un ghiaccio a bel riflesso azzurrino attraversano il ghiacciaio; e potrebbero facilmente indurre in errore lo studioso, e far credere ad una stratificazione.

La struttura zonata del ghiacciaio proviene da un maggior assorbimento di acqua in certi punti corrispondenti a fessure preesistenti; sotto l'opera dell'umidità il ghiaccio di queste zone presenta una tinta azzurrognola molto brillante in forza dell'acqua interposta, come ho osservato parlando del color del ghiaccio; impallidisce la tinta esponendone una lamina all'aria atmosferica. Lo spessore delle zone è di molto inferiore a quello dei veri strati, e più variabile; le prime sono pressochè verticali, mentre i secondi possono essere inclinati; limitate poi le zone generalmente alla parte mediana dei ghiacciai. Gli spazi interposti agli strati godono di una certa regolarità, mentre le zone di ghiaccio sono disposte irregolarmente vicinissime, oppure distanti le une dalle altre; gli interstizi di stratificazione contengono sabbie e detriti, ciò che raramente incontrasi in corrispondenza delle bande azzurre. Gli strati attraversano in

tutto il suo spessore il ghiacciaio, mentrechè le zone si assottigliano e scompaiono ad una certa profondità. Il parallelismo tra le zone e gli strati non è costante; pare che le zone sieno prodotte da infiltrazione di acqua che si congela in fessure formatesi nel ghiacciaio; difatti alle zone corrispondono sempre delle fessure; il congelarsi dell'acqua agirebbe come forza dilatante e tenderebbe ad allargare ed a prolungare in basso e lateralmente le spaccature; la disposizione stratificata del ghiacciaio favorisce quest'operazione; si comprende pure come queste zone non possono estendersi molto in basso nel ghiaccio, giacchè ad una certa profondità l'acqua non si congelerebbe più, non essendo più sensibile alle variazioni atmosferiche esterne. Le bande azzurre spiccano maggiormente là dove il ghiaccio è dotato di un colore bianco opaco; da ciò che esse sono meno visibili verso il termine dei ghiacciai, ove il ghiaccio è più compatto e limpido. Una quantità di fessure capillari attraversa queste zone di ghiaccio, e son quelle per cui l'acqua allo stato liquido può imbevver la massa. L'esame scrupoloso e complessivo di tutti i caratteri differenziali accennati può ovviare al pericolo di cadere in errore, e considerare come vero strato ciò che non si deve tenere che come una zona di ghiaccio.

5°) Dissi, parlando della temperatura interna del ghiacciaio, che essa non è mai inferiore a 0°; da ciò ne viene che la faccia inferiore di un ghiacciaio non può essere aderente al suo fondo. L'aderenza ha luogo non al fondo ma bensì sui margini, ed anche in corrispondenza di essi è passeggera; esiste solo in inverno. Lungo i margini di un ghiacciaio tra le pareti di roccia e la massa di esso si formano in certi casi dei torrentelli, che per via di erosioni penetrano fra roccia e ghiaccio e vanno poi a disperdersi sul fondo; i canali e le erosioni per cui passano le acque di questi piccoli torrenti, al sopravvenire dell'inverno si obliterano, ed allora si producono per accumulamento dell'acqua dei laghetti che ai primi calori dell'estate, aprendosi nuovamente le comunicazioni col fondo del ghiacciaio, si vuotano completamente; questo fatto prova esister veramente un'aderenza sui margini del ghiacciaio alle rocce su cui posa, ma che essa è temporaria. Charpentier, per appoggiare l'aderenza delle superficie profonde col fondo del ghiacciaio, porta il

fatto del rimanere immobili e fortemente aderenti alle rocce di quelle cornici talvolta voluminose che sovrastanno alle crepaccie periferiche; là havvi certamente aderenza permanente; ma vi s'incontra già la temperatura dell'alta nevata, quindi non vi si opera quella fusione la quale più in basso basterebbe a distaccare il ghiacciaio dal suo fondo, e il freddo è tanto più potente, che per la loro disposizione queste cornici sono molto esposte alla evaporazione. Si può quindi conchiudere, se vi ha aderenza del ghiacciaio al suo fondo, essa è temporaria; che vi ha aderenza permanente in corrispondenza delle crepaccie periferiche, ma non si può da queste dedurre l'esistenza della prima, essendo le condizioni affatto diverse.

La superficie profonda dei ghiacciai è dunque libera; ma non solo è libera, eezianidio foggia a volta, e questa disposizione bizzarra e fantastica è resa evidente al limite inferiore, scavata da una spaziosa ed ampia caverna donde escono spumeggianti le acque del torrente che dal ghiacciaio si origina. Pericoloso è l'innoltrarsi sotto queste volte di ghiaccio per i massi che facilmente si staccano e precipitano al basso. Questo sbocco terminale, o canal principale, si ramifica procedendo sul fondo del ghiacciaio verso le sue origini, ed una infinità di piccoli ruscelli, come i capillari delle vene, si concentrano in pochi torrenti precipui che finiscono per dar luogo all'unico canale che sbocca dal lembo inferiore. Si racconta di una guida, che caduta in una crepaccia di un ghiacciaio del Grindelwald, riuscì, dopo molti stenti, ad uscire per l'apertura terminale allo sbocco del torrente. Queste caverne o vòlte, che probabilmente costituiscono la disposizione di tutta la superficie profonda dei ghiacciai, è originata dallo struggersi del ghiaccio, là ove esso è a contatto colle acque di fusione superficiale, che attraversando gli strati del ghiacciaio portano seco un certo grado di calore.

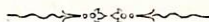
Sono poi dilatate per franamento, e per l'azione dissolvante del vento caldo delle sue vallate, che penetrando con forza sotto gli anditi e le arcate, circola dovunque scacciando al di fuori l'aria fredda, per modo che si stabiliscono delle correnti ben conosciute dagli alpigiani di aria fredda dallo interno all'esterno per lo sbocco del torrente, di vento caldo dall'esterno all'interno.

Il fondo del ghiacciaio non è costituito realmente da viva roccia, bensì da uno strato di fanghiglia risultante dallo stritolamento

in presenza dell'acqua di massi staccati dalle rocce per opera del ghiacciaio, e di quelli che accidentalmente provengono dalla superficie e per le crepacce arrivano talvolta al fondo del ghiacciaio.

4°) Una enorme quantità di acqua di fusione superficiale viene ad esser assorbita dal ghiacciaio, il quale può paragonarsi ad una spugna; di quest'acqua assorbita una porzione goccia sul fondo e dà luogo a rivoletti, che riunendosi in un sol tronco costituiscono le origini dei grandi fiumi e torrenti; se l'acqua di fusione fosse tutta assorbita, il ghiacciaio agendo da filtro e rattenendo la sabbia ed i detriti in tal guisa, i torrenti uscirebbero limpidi e privi d'ogni sostanza in sospensione; ma nei periodi di più attiva ablazione l'acqua non tutta s'infiltra nel ghiacciaio, ma una parte ne lava la superficie dai detriti e dalla fanghiglia che seco trasporta in basso; da ciò l'intorbidarsi dei torrenti alpini nelle ore calde delle giornate estive. Nell'inverno l'opera di fusione cessa, ma non immantinenti; perciò il torrente diminuisce gradatamente, poichè da tutta la massa del ghiacciaio continua a scolare l'acqua di cui è impregnata, e scema il volume del torrente sino a rimaner questo a secco; quando dal ghiacciaio non esce più un corso di acqua, non si può dire che non ve ne esista più, ma vi rimane solo quel tanto indispensabile per mantenere la plasticità del ghiacciaio. In alcuni casi però, anche durante l'inverno, continua lo scolo di acqua, e questo proviene da sorgenti sottoposte al ghiacciaio; difatti può succedere che da due diramazioni di uno stesso ghiacciaio uno dia un piccolo ruscelletto e l'altro no, perchè sul fondo dell'uno hanvi sorgenti che mancano sul fondo dell'altro ramo; questo fatto va contro anche all'opinione di alcuni, che gli strati più profondi del ghiacciaio possono fondersi in forza del calore centrale; se ciò fosse, non vi sarebbe ragione perchè un ghiacciaio somministrasse acqua durante l'inverno; mentrechè il torrente che deriva da un ghiacciaio vicino rimane perfettamente a secco.

PARTE SECONDA



GHIACCIAI ANTICHI

Capitolo I

Ghiacciai antichi italiani — Loro origine — Diluvio alpino — Terreni superficiali della valle del Po — Descrizione del Ghiacciaio della Dora Riparia — Ghiacciaio della Dora Baltea — Ghiacciaio del Lago Maggiore.

1°) I fenomeni fin qui descritti sono imponenti nei ghiacciai moderni più famosi, quali sono quelli del M. Bianco e del M. Rosa, delle Alpi Bernesi, ma non sono che pallide copie di quegli stessi fenomeni analoghi che doveano compiersi sui ghiacciai antichi; e per rendersi ragione di ciò basta il confrontare l'estensione microscopica degli attuali con quella dei ghiacciai che, durante il periodo glaciale, staccandosi dalle più elevate cime delle Alpi, discendevano scavalcando contrafforti, riempiendo le vallate sino all'ultime falde della catena alpina, invadendo le pianure sottostanti, portando i loro ghiacci là ove oggidì fioriscono città e villaggi, ghiacciai che aveano centinaia di metri di lunghezza, e la cui larghezza ci è ora rappresentata da quella delle vallate stesse che allora occupavano.

Osservando i fenomeni del ghiacciaio della Brenwa, che scende dal versante orientale del M. Bianco, è egli possibile rendersi conto dell'imponenza loro all'epoca in cui il ghiacciaio stesso, riempiendo tutta la valle d'Aosta, veniva a sboccare nelle pianure di Tina estendendosi fino a Cavaglià, a pochi chilometri dalla linea del Po? Diffatti, come le incontriamo noi le tracce di questo immenso ghiacciaio? Con uno sviluppo enorme e tale da diventar ignobili accumulamenti di materiale glaciale le più imponenti morene d'oggi poste a confronto delle antiche; i ciottoli striati, le rocce levigate sono meno reperibili perchè furono scancellati, distrutti dagli agenti atmosferici, dalle acque; ma non così delle morene; cosa si dovrà pensare della estensione, della potenza d'azione di un ghiacciaio che ci costrusse una morena laterale di oltre 17 chilometri di lunghezza come è la Serra d'Ivrea su più di 650 metri di altezza, che ci forma degli anfiteatri morenici come quelli di Ivrea, di Rivoli e del Lago Maggiore?

Per spiegare l'esistenza di una gran parte dei depositi superficiali delle pianure sottostanti alle Alpi, ed il mezzo impiegato dalla natura per il loro trasporto, si ebbe ricorso a molte ipotesi, e gran tempo passò prima che si ammettesse l'azione dei ghiacciai per compiere fenomeni così grandiosi; ed anche oggidì alcuni pochi negano d'accettare le nuove teorie invalse nel mondo scientifico. Dopo aver descritti alcuni dei luoghi classici italiani, antichi alvei di ghiacciai, dirò di quelle più importanti ipotesi invocate a questo riguardo, e porterò contemporaneamente gli argomenti che le combattono.

Se per descrivere i ghiacciai antichi io scelgo il versante italiano non è senza ragione. Le vallate svizzere e savoiarde, molto più estese per conformazione della catena, presentano oggidì maggior numero di ghiacciai estesi e caratteristici per lo studio dei fenomeni attuali; il versante meridionale, scosceso, dirupato, scende rapidamente al piano, presenta pochi ghiacciai, e quei pochi incompleti, a disposizione confusa di morene, in condizioni sfavorevoli per lo studio attuale; ma lo stesso non si può dire per i ghiacciai del periodo glaciale; la esatta delimitazione delle vallate, la brevità di queste facevano sì che il ghiacciaio proprio di ciascuna di esse giungeva in basso, isolato dai vicini, ed estenden-

dosi liberamente in una larga pianura lasciava ben delineati i suoi limiti segnati dalle morene, per cui più facile, più interessante, più fecondo riesce in Piemonte e in Lombardia lo studio sugli antichi ghiacciai, che non in Svizzera, in Savoia, dove tante correnti di ghiaccio, scendendo da punti lontanissimi per vallate eminentemente sinuose, s'incontravano, si comprimevano vicendevolmente, incagliando così il libero prodursi di quei fenomeni che doveano poi rivelarne l'esistenza e segnarne l'antica estensione; a ciò aggiungasi il non esistere colà una pianura così estesa quale è quella che presenta la vallata del Po. Ecco anche in ciò la ragione perchè la teoria del trasporto del terreno erratico per mezzo dei ghiacciai incontrò tante difficoltà in Svizzera, perchè i fatti che potevano comprovarla sono così poco marcati, così confusi che facilmente si prestano ad altre spiegazioni. Anche per un'altra ragione m'indussi a scegliere come campo speciale l'Italia; nel dire rapidamente degli studi fatti sui fenomeni attuali dei ghiacciai non potei citare altro che nomi stranieri; parlando del periodo glaciale specialmente sul versante sud delle Alpi mi occorrerà di citare nomi italiani; e quantunque si possa dire che agli uomini benemeriti delle scienze è patria il mondo, pure è caro a me italiano il poter ricordare quei miei compatrioti che seppero col loro studio far progredire la scienza e rendersi venerandi fin presso gli stranieri.

Dei ghiacciai antichi i soli studiati son quelli dell'epoca post-terziaria, e segnatamente di quella porzione di tal epoca conosciuta sotto il nome di *periodo glaciale*; ed è naturale, poichè di essi soli sussistono numerosi e ben conservati documenti; dei più antichi pochissimi ne abbiamo ed insufficienti a svelarcene l'andamento e l'estensione.

I massi levigati e striati che s'incontrano in varii terreni ci provano la loro derivazione da ghiacciai, ma son pochi ed isolati, e là dove si trovano furono portati piuttosto da zattere di ghiaccio galleggianti nelle acque dei mari allora esistenti, che dai ghiacciai stessi; le zattere struggendosi li lasciavano cadere in fondo al mare, ove si disponevano nei sedimenti. Tali sono i massi e ciottoli striati dello Stalfordshire in Inghilterra appartenenti al piano geologico del permiano, i massi erratici di Talcheer nell'India, dello

Shrop-Shire e del Worcestershire in Inghilterra; quelli triassici nei conglomerati cupriferi al Lago Superiore in America; i miocenici del Righi e dei conglomerati delle colline di Torino. Venendo poi ai ghiacciai del post-terziario, giacchè per il pliocene non risulta esistessero ghiacciai, Charpentier descrisse minutamente ed a lungo quello che partendo dall'alta valle del Rodano discendeva nel Vallese riempiendolo dei suoi ghiacci sino al Giura, dove deponeva in parte le sue morene, indi volgendo a Nord si spingeva fino a Neuchâtel. Martius seguì lungo la valle dell'Arve per Chamounix e Sallanches fino a Ginevra le tracce dell'antico ghiacciaio che, scendendo dalle più alte vette del massiccio del M. Bianco andava a raggiungere presso Ginevra quello del Rodano, che anzi faceva deviare a Nord nell'atto dell'incontro. In Italia, dalla valle della Stura sopra Cuneo fino a quello del Tagliamento, le vallate alpine erano ripiene di ghiacciai che discendendo nelle pianure del Po lasciavano una zona di morene parallele alla catena stessa, interrotta qua e là da grandi laghi come quelli di Garda, di Como e di Varese e il Lago Maggiore. Sia che si studi il terreno erratico in Piemonte oppure in Lombardia, si giunge sempre ai medesimi risultati generali sulle teorie del trasporto per opera dei ghiacciai; tanto in Piemonte che in Lombardia abbiamo rocce levigate, morene e laghi di ghiacciaio; quindi io mi limiterò alla descrizione di tre dei principali ghiacciai antichi italiani, di quelli cioè che occupavano la valle Susina, la valle della Dora Baltea, e le valli della Toce e del Ticino.

2°) Il terreno pliocenico è largamente sviluppato in Italia, e nel bacino del Po raggiunge una potenza superiore ai 600 metri; ciò fu constatato in alcune osservazioni, in trafori a grande profondità. Il pliocene italiano si può distinguere in due piani: l'uno inferiore essenzialmente marino, e il superiore caratterizzato da depositi fluvio-lacustri; il primo è costituito dalle argille turchine fossilifere, così conosciute nell'Apennino, ricoperte da sedimenti di costiera, conglomerati cioè e sabbie gialle; questo piano inferiore è quello che raggiunge la grande potenza più sopra accennata; il superiore molto meno sviluppato ci fa conoscere che sul terminare dell'epoca pliocenica la valle del Po, specialmente verso la sua parte più ele-

vata, fu soggetta ad un lento sollevamento, per cui l'Adriatico, che prima lambiva il piede delle Alpi, ritirandosi a poco a poco lasciò emerso un largo tratto di terreno ricoperto di estesissime paludi; ecco allora depositarsi, invece di resti marini, le spoglie di animali terrestri e di acqua dolce, quindi la formazione del piano superiore pliocenico fluvio-lacustre; ma di mano in mano che le terre si asciugavano, grossi mammiferi terrestri vennero ad abitar queste contrade nuove emerse, e dal pliocene superiore passiamo al post-terziario inferiore, ricco di avanzi di mastodonti, elefanti, rinoceronti, cavalli ed altri mammiferi. In questo periodo di transizione dal pliocene al post-terziario la temperatura della valle del Po doveva avvicinarsi di molto a quella delle regioni tropicali; diffatti i resti di quel periodo appartengono ad animali che non avrebbero potuto vivere a temperatura più bassa. Questo sguardo dato ad un periodo anteriore al glaciale sembrerebbe inopportuno ove non si considerasse che senza d'esso non si potrebbe spiegare il grande sviluppo consecutivo dei ghiacciai. Cosa sarà avvenuto in una estesa regione paludosa, soggetta ad un clima tropicale ed a venti periodici del mezzogiorno umidi e caldi? Certamente una potentissima evaporazione; e le grandi masse di vapori che dal piano si portavano in alto verso le vette alpine si risolvevano in pioggia ed in neve; e ciò in proporzione enorme, avuto riguardo all'attivissima evaporazione; quindi i ghiacciai di allora ricevevano un alimento continuo immensamente superiore alla quantità di ghiaccio che veniva a distruggersi per ablazione e fusione; conseguenza diretta era il loro rapido estendersi e discendere molto più in basso di ciò che non facciano oggidì; ed è appunto quello che è succeduto. Ma in seguito a questo enorme sviluppo dei ghiacciai, una grande porzione del calore dell'atmosfera doveva venire assorbita nell'atto della fusione del ghiaccio, quindi necessariamente si dovette dalla temperatura tropicale preesistente passare gradatamente ad un'altra molto più bassa; ed infatti superiormente ai resti d'animali di regioni calde si trovarono avanzi di cervi, di buoi, di marmotte, animali tutti che richiedono per la loro esistenza il clima freddo; e secondo ogni probabilità nella valle del Po si passò, durante l'epoca glaciale, dal calore dei tropici al freddo dello Spitzberg. Non conviene però esagerare il freddo del periodo glaciale; Martius fece

il calcolo che abbassando di soli 4° la temperatura media della Savoia e della Svizzera, il Mare di ghiaccio di Chamounix discenderebbe nuovamente col suo piede fino a Ginevra.

5°) Ora vediamo quali tracce abbiano lasciato di loro esistenza questi immensi ghiacciai. Anzi tutto considerando che quanto maggiore è l'estensione d'un ghiacciaio tanto più imponente è la massa di acqua prodotta dall'ablazione, è chiaro che dai ghiacciai antichi torrenti voluminosissimi dovevano originarsi, trascinare violentemente in basso i materiali morenici, discendere rovinosamente al piano, e là allargandosi liberamente deporre in potenti depositi alluvionali i materiali trascinati; questi dovevano perdere nel trasporto tutti i caratteri speciali di provenienza glaciale, ed assumere invece quelli di materiali torrenziali. Dal piede delle Alpi a giungere fino al Po una potente formazione d'antica alluvione ricuopre i sedimenti post-pliocenici fossiliferi. Questa formazione è disposta a guisa di tanti coni col vertice allo sbocco delle singole vallate, di dove irradiando scende in piano inclinato di dolcissimo pendio verso la parte centrale del bacino del Po; questa singolare disposizione fu quella che fece nascere l'idea di contrassegnare questa formazione col nome di coni di deiezione. Il materiale di cui sono costituiti questi coni variano per ciascuno d'essi, ma sempre sono identici colle rocce delle vallate da cui provengono. Al disotto d'essi stanno, come dissi, i depositi post-pliocenici con resti di grossi mammiferi; a vero dire essi non furono ancora avvertiti in tutta quella porzione di terreno compresa tra la sponda sinistra del Po e il piede delle Alpi, mentrechè sviluppatissimi sono a partire dalla sponda destra; avrassi a dire perciò che le due regioni si sieno trovate in condizioni diverse, ed il deposito antico alluvionale debba essere contemporaneo dei depositi terrestri della sponda destra del Po? No, certamente; su tutta la valle Padana si formarono sedimenti post-pliocenici, ma appena cominciò questa formazione ebbero luogo le violente innondazioni per opera dei torrenti glaciali; i nuovi depositi sulla sponda sinistra furono erosi, asportati, e rimpiazzati dal diluvium, mentre sulla sponda sinistra continuavano a formarsi tranquillamente; tuttociò che eravi d'animali viventi in quell'epoca nella valle del Po abbandonò la sponda

sinistra, teatro di spavento, desolazione e rovina, e si portò sulla destra al sicuro dalle inondazioni alpine.

Il diluvium, i conì di deiezione cagionando l'orizzontalità primitiva in un piano inclinato a debole pendio obbligò le acque a concentrarsi nella parte più bassa; esse si costituirono in fiume al limite estremo del diluvium, ed ecco formato l'attuale corso del Po; quindi esistenza di sviluppatissimi depositi post-terziarii fossiliferi sulla destra sponda pel Po, e mancanza assoluta di alluvione antica, formazione di conì di deiezione sulla sinistra con pochissimo sviluppo di depositi fossiliferi. I conì di deiezione entrano adunque nei prodotti glaciali e costituiscono come l'avanguardia dei ghiacciai nel loro rapido discendere verso la pianura; fatto analogo succede anche oggidì, ma in piccolissima scala. Alcuni ammisero che il diluvium si fosse depositato in un mare profondo, negando per tal modo il sollevamento della valle del Po durante l'ultima fase del periodo pliocenico; ma allora come spiegare la mancanza di limo e fanghiglia nel deposito costituito essenzialmente di ciottoli? Evidentemente essi ciottoli furono lavati e liberati dalla fanghiglia per opera d'acque correnti: inoltre il diluvium non si presenta in veri strati, ma bensì con una irregolarità tutta caratteristica dei depositi alluvionali; il decrescere del volume dei ciottoli dal vertice dei conì alla loro periferia prova il diminuire di violenza nelle acque di trasporto, e ciò succede appunto quando un torrente ingrossato sbocca da una valle angusta in una estesa pianura. Questo diluvium raggiunge anche a qualche chilometro dalle Alpi la potenza di 20 e più metri, e nella sua porzione profonda si trasforma in un conglomerato visibile molto bene sulla sinistra del Po sotto a Torino, e nell'aveo della Dora Riparia vicino ad Alpignano. Al professore Gastaldi, a Mortillet, a Martius noi dobbiamo gli studi più accurati sui terreni diluviali della valle alta del Po.

4°) Dalle pendici di Rochemichel, del Moncenisio, della Roche-melon, della Roche de Ambin, del Tabor, del Monginevro, si staccava il gran ghiacciaio della valle Susina; le due principali radici erano quelle che scendendo dalla valle di Oulx e dal Cenisio si riunivano presso Susa, la seconda però molto meno imponente; sul colle del Cenisio, e precisamente al piano di S. Nicolao, il signor

Leblanc per primo osservò dalle roccie rotondate e lisce nel senso della valle, segni evidenti che il colle del Cenisio era occupato da un ghiacciaio; roccie arrotondate formano l'imbasamento dell'antico forte della Brunetta presso Susa; fra le salite del Cenisio e quest'ultima città una stupenda morena frontale a monte del villaggio di Ferriera sta ad indicare un periodo di arresto nell'avanzarsi e nel retrocedere del ghiacciaio. Presso Susa avea luogo la fusione dei due rami provenienti dal Cenisio e dalla valle d'Oulx; a valle della città procedeano riuniti lasciando tracce ancora ben conservate di loro passaggio sui fianchi di Monte Pirchiriano che sporge verso il mezzo della valle in vicinanza di S. Ambrogio; questo scoglio, famoso nella storia, perchè là si appoggiavano le Chiuse Longobarde, visitato dai forestieri per l'antica Abbazia di S. Michele, per le imponenti ruine, per il sepolcro reale, è interessante per il geologo stante le strie visibilissime su un'area levigata de' suoi fianchi; le strie sono dirette obbliquamente e alquanto in alto verso il mezzo della valle, ciò che mostra che il ghiacciaio, trovando nel suo corso un ostacolo, era obbligato a restringersi e piegarsi verso la parte mediana della vallata; sul giogo che unisce il picco di S. Michele alla catena montuosa fiancheggiante, blocchi erratici sono sparsi qua e là, ed alcuni degli antichi edifizi sono costrutti sui resti della morena che riveste i fianchi del Pirchiriano dal lato di a monte, che sarebbe una morena di ostacolo. Il picco della Sacra doveva esser circondato dai ghiacci, un piccolo ramo del ghiacciaio scavalcava il giogo tra la catena e lo scoglio, per cui questo doveva emergere come isola dalle onde del mare. Oltrepassato lo stretto di S. Ambrogio incontrava la corrente di ghiaccio uno sbocco alla sua destra, e lateralmente questo sbocco un secondo scoglio costituito da un rialzo serpentinoso su cui oggidi sta il castello e poggia il villaggio di Avigliana; urtando in quest'intoppo, sormontandolo in parte, il ghiacciaio si divideva in due rami, l'uno seguiva a discendere pel corso attuale della Dora, l'altro si ripiegava ad angolo retto dirigendosi al sud per l'avvallamento ora accusato dai laghi di Avigliana. Lo sprone di serpentino contro cui urtava il ghiacciaio al punto di separazione dei due rami mostra una duplice direzione delle strie visibilissime e ben conservate; un sistema

diretto da nord a sud pel ramo che tendeva verso Trana ed un altro sistema in direzione ovest-est dovuto al ramo principale. La diramazione diretta a mezzogiorno deponeva sul fianco orientale della montagna tra la Sacra di S. Michele e Trana una morena laterale destra che si osserva anche oggidì con tutta facilità; meno sviluppata è la sua morena laterale sinistra addossata al rialzo serpentinoso che sta fra Avigliana e Trana; a mezzogiorno lo stesso ramo deponeva la sua morena frontale che viene a congiungersi colla frontale dell'altro ramo. Questo poi procedendo ad oriente incontrava allo sbocco della valle un ostacolo insormontabile nel M. Musineto, per cui invece di perdurare nella direzione primitiva piegava a sud-est e riusciva a deporre la sua morena frontale sulla direzione di quella del primo ramo, venendo così a costituirsi un'unica morena terminale per le due diramazioni.

Una gigantesca morena laterale destra veniva dal ramo principale deposta tra Rivoli ed Avigliana, che foggiate ad immensa gradinata dimostra come il ghiacciaio aveva subito periodi di arresto nell'abbassamento dal livello primitivo; la morena laterale sinistra si appoggiava alle falde del Musineto, ma di essa non ne sussistono più che pochi lembi. Tanto fra le morene laterali del ramo procedente verso Trana, come fra quelle del ramo diretto verso Rivoli si possono anche oggidì riconoscere delle piccole elevazioni trasversali; esse sono i residui d'altrettante morene frontali deposte in periodi di arresto nel ritirarsi dei due ghiacciai; alle acque accumulate fra alcune di queste morene frontali sono dovuti i laghi di Avigliana.

Nel suo periodo di massimo sviluppo il ghiacciaio si spingeva fin verso Pianezza e Collegno, ma vi si mantenne per poco tempo, giacchè non ebbe campo a costruire una morena terminale e lasciò puramente il deposito glaciale disperso, accusato da leggiere ondulazioni del terreno; contemporaneamente vi depose degli enormi massi erratici sveltati alle montagne della valle Susina, di cui alcuni contano fino a 20 metri di lunghezza su 10 a 12 di larghezza; tali il celebre Rocco di Pianezza che ha un volume di 2000^m cubi, quelli della Maddalena tra Rivoli e S. Antonio, di Alpignano, di S. Pancrazio, ed altri non meno voluminosi. A Rivoli comincia la vera morena frontale che si estende da Trana per Villarbasse, Rivoli e Caselletto fino allo Scottina presso il torrente Casternone; non è una morena unica,

ma costituita bensì da tanti rialzi concentrici come per molte morene addossate, di cui la più interna poggia sul fianco sud-est dello sprone serpentinoso di Avigliana. Questa stupenda morena frontale complessa è ricca di enormi massi erratici. I materiali di cui son costituite queste varie morene si distinguono facilmente dal sottostante diluvium; nelle morene abbiamo massi d'ogni grandezza, angolosi, striati, lisciati, disposti regolarmente in mezzo a sabbia, ghiaia e fanghiglia; nel diluvium invece abbiamo ciottoli arrotondati, non striati, di volume pressochè uniforme, disposti in una stratificazione analoga a quella dei depositi dei torrenti e scevri completamente da limo e fanghiglia.

Da Alpignano procedendo colla ferrovia verso Rosta, un taglio profondo della morena frontale porge il comodo di vedere magnificamente la disposizione dei materiali morenici. La morena frontale, come dissi, è preceduta nella pianura da una zona di terreno glaciale disperso che è costituito dalla morena superficiale e dalla profonda dell'antico ghiacciaio. Il terreno morenico riposa direttamente sul diluvium scavato internamente all'anfiteatro morenico; ma di ciò a proposito della riescazione dei bacini lacustri per opera dei ghiacciai. La disposizione della morena frontale e delle laterali giustifica pienamente il nome d'anfiteatro morenico. La lunghezza dell'antico ghiacciaio della valle Susina viene calcolata a 95 chilometri; era gigantesco vicino a quelli d'oggi; arrivando dalla stretta valle di Susa ad Avigliana, si espandeva in un immenso mare di ghiaccio da cui emergevano come isole dai flutti marini i picchi del Pirechiriano e di Avigliana; portava il suo lembo estremo su un arco di circolo che da Trana per Villarbasse, Rivoli, Collegno, Pianezza e Scottina terminava alle falde del Musineto.

5°) Più imponente dovea riuscire nel suo aspetto e nei suoi fenomeni il ghiacciaio della valle d'Aosta, che misurava 130 chilometri di lunghezza. Fra i ghiacciai attuali di questa vallata, quello che per la sua posizione e direzione, e pel variare di estensione cui va soggetto, si può con ogni probabilità considerare il punto di partenza del grande ghiacciaio antico della Dora Baltea, è quello della Brenwa, che addossato al fianco orientale del Monte Bianco scende sul confluente delle due vallate di Ferret e dell'Allée Blanche. L'immenso

ghiacciaio della Baltea era competente rivale di quello che sul versante nord delle Alpi Pennine riempiva la valle del Rodano, e che venne studiato e descritto da Charpentier. Scendendo dal M. Bianco esso raccoglieva tutti i minori ghiacciai che il colosso delle Alpi inviava alla valle d'Aosta; nell'Allée Blanche noi troviamo sotto il monte Chetif rocce calcaree lisce e profondamente striate nel senso della valle verso Courmayeur. La morena laterale sinistra della Brenva odierna presenta in piccola scala una configurazione identica a quella della grande morena laterale sinistra del periodo glaciale presso Ivrea, la Serra; ciò induce nell'opinione che ogni ghiacciaio abbia una attitudine a configurare in certe maniere speciali la sua massa ed i suoi depositi. A valle di Courmayeur veniva ad ingrossare il ghiacciaio da destra una schiera di correnti di ghiaccio dalle vallate della Thuile, di Grisanche, Rhêmes, Savaranche, Cogne e Champorcher, fino a che il ghiacciaio principale veniva a sboccare nella pianura; ma quelle che maggiormente contribuivano ad aumentare il volume di quell'immensa fiumana di ghiaccio erano i ghiacciai secondari che discendevano da sinistra provenienti dal colle Ferret, dal Gran San Bernardo, dal Combin, dal Matterhorn, dal M. Rosa per le valli di Ferret, S. Remy, Peline, Tournanche, Challant e Gressoney. In ognuna delle suddette vallate s'incontrano residui di morene, rocce levigate e striate. Lungo il corso della Dora Baltea larghi tratti di falda montuosa laterale son ricoperti di terreno glaciale; il castello di Sarre a monte di Aosta è fabbricato su di un resto d'antica morena frontale; al sud della stessa città sui fianchi dell'Émilis e di Becca di Nona, più oltre a 600^m sulla vallata si innalza la morena destra laterale. A Mont-Jovet, dove la valle si piega repentinamente dirigendosi a mezzogiorno, e discende per un'angusta forra nel basso di Verres, colà larghe superficie di roccia sono lisce e striate; lo stesso fatto si osserva chiaramente a Pont-St-Martin e nello stretto di Bard. Oltrepassato il villaggio di St-Martin, il ghiacciaio si spandeva nella pianura del Po scavalcando un cordone di rocce dioritiche su cui sta attualmente la città d'Ivrea, e arrotondando e levigando le cupole di diorite; chiunque visiti queste località vedrà allo sbocco di valle d'Aosta una serie di poggi emergenti come isole sul livello della pianura; essi sono massi dioritici interessati dall'antico ghiacciaio,

il cui passaggio non potrebbe esser meglio svelato e posto in evidenza. Appena sboccato dalla valle originaria esso ghiacciaio, perdendo nello espandersi gran parte della sua forza di trasporto, deponeva lateralmente le sue due morene; a sinistra quella stupenda collina che partendo dalle alture di Andrate sui fianchi del Monbarone scende con lieve pendio a sud-est fino a Cavaglià e Saluzzola; la sua cresta, unica dapprima, si divide nel tragitto in varie creste secondarie, che giungono fino al numero di sei o sette, chiudendo fra loro dei valloncini longitudinali; giunto al suo limite estremo si congiunge colla morena frontale dello stesso ghiacciaio; la regolarità di forma, l'elevazione dal livello della pianura, la sua lunghezza fanno di essa una morena laterale tipo, forse la più bella e caratteristica di tutta Europa; ebbe il nome di Serra poichè sta a rappresentar un baluardo, un riparo di gigantesche proporzioni. Il prevalente sviluppo della morena laterale sinistra del ghiacciaio della Dora Baltea è dovuto alla maggior ampiezza dei circhi da cui provenivano i ghiacciai secondari ad ingrossar da sinistra il principale, trasportando essi per conseguenza in maggior copia i materiali morenici. La morena laterale destra si stacca dirimpetto ad Andrate dal massiccio montuoso, alle cui falde sta il villaggio di Brozzo, discende meno regolare dalla Serra fino a Strambinello, dove tagliata profondamente dal corso della Chiusella, si continua sulla sponda opposta del torrente fino a raggiungere la morena frontale a S. Giovanni e a S. Martino.

Le rocce rotondate in vicinanza del ponte dei Preti sotto a Strambinello e la direzione delle strie che si tagliano ad angolo acuto, provano che un piccolo tributario discendeva dalla valle Chiusella a portare i suoi ghiacci a quello della Dora, rompendo al punto d'unione della laterale destra colla morena frontale la continuità dell'anfiteatro morenico. La morena frontale descrive un grande arco i cui punti estremi sono da una parte il taglio della Chiusella, dall'altra il lago Viverone fra Azeglio e Cavaglià; costituita da una serie di eminenze e colline allungate, essa chiude in sè una quantità di piccoli laghi e di torbiere, quali sono quelle di San Giovanni e San Martino; la sua direzione è a sud-est fin verso Candia e Caluso; là si ripiega ad arco, lascia il lago di Candia ed è tagliata profondamente dal letto della Baltea; prosegue ad est man-

dando in vicinanza di Borgo Masino una diramazione verso il centro dell'anfiteatro più presso Tina; ciò prova che il ghiacciaio nel suo massimo di estensione si divideva in due rami che procedevano l'uno contro Caluso, l'altro verso Cavaglià. Seguitando in direzione est, la morena frontale non è più così unita come nella sua prima metà, ma frastagliata ed interrotta qua e là giunge fino al lago di Viverone ed a Cavaglià, ove si congiunge, colla morena laterale sinistra, colla Serra; il massimo d'elevazione della morena frontale è di 500^m sul livello della Dora.

Nell'interno dell'anfiteatro morenico due piccole morene laterali parallele alle già descritte si estendono da Chiaverano sopra Ivrea a Bolengo per la sinistra, e dalla Chiusella a Romano e Strambino per il lato destro; esse stanno a segnare un periodo d'arresto nel restringersi laterale del ghiacciaio.

Dove la Chiusella entra nell'anfiteatro morenico è da osservarsi uno stupendo taglio, ove si possono vedere 12^m di sabbia ed argille plioceniche sottoposte ad uno strato diluviale di 12^m fino a 50^m di potenza, ricoperto dal terreno morenico; interessante è questo spaccato per dimostrare come tra l'epoca pliocenica e la diluviale non esistessero ghiacciai, poichè ove ciò avesse avuto luogo si dovrebbero vedere dei depositi glaciali tra il pliocene ed il diluvium.

La grande morena frontale è anche qui preceduta verso la pianura del terreno glaciale disperso, e grossi blocchi erratici s'incontrano nelle colline di Mazzè e Moncrivello; ad oriente, prima di giungere al corso dell'Elvo, un largo tratto di paese, la regione della Bessa, è ricoperto da glaciale disperso, ed è appunto là dove si operavano degli scavi per la ricerca di pagliuole d'oro nel diluvium sottostante al terreno morenico.

Fra gli anfiteatri morenici quello d'Ivrea è indubitatamente il più ampio, il più completo, il più istruttivo; là abbiamo morene laterali sviluppatissime e perfette, una grande morena frontale, terreno glaciale disperso su largo tratto di paese; inoltre prima di giungere ad Ivrea havvi un cordone di rocce lisciate ed arrotondate; havvi finalmente dei laghi morenici in copia, fra cui quelli di Alice, Candia e Viverone sono i più importanti.

6°) Resta a dare un rapido sguardo all'antico ghiacciaio che provenendo dal gruppo del Rosa e da quello di San Gottardo scendeva ad occupare il bacino del Lago Maggiore e a lasciare le sue morene a mezzogiorno di Arona. I ghiacciai delle due Dore risultanti dalla riunione di molti si spingevano nella pianura con una sola terminazione; ciò non succedeva per quello della Foce e del Ticino. Dal M. Rosa, dal Sempione, dal Gries per val Anzasca, di Vedro e Formazza potenti fiumi di ghiaccio scendevano a costituire un ghiacciaio complesso nella valle della Toce, mentre a levante dalla Furka, dal S. Gottardo, dal Lucomagno, dal S. Bernardino più importante gruppo di ghiacciai veniva per le valli Maggia, Verzasca, Levantina, Blegno, Calanca e Misocco a concentrarsi verso il luogo ora occupato dalla porzione superiore del Lago Maggiore. Rocce arrotondate, avanzi di morene segnano il corso dei due rami nelle varie vallate; i passi del Sempione e del Gottardo abbondano di rocce pulimentate e striate e di laghetti glaciali. Il ramo dell'Ossola si univa a quello del Ticino presso a Pallanza, non prima però d'aver trovato nel suo corso due ostacoli insormontabili nel Mont'Orfano e nel Monte di Baveno; questi due promontorii non solo furono rivestiti da morene di ostacolo, ma giunsero a dividere le masse di ghiaccio e a spingerne una parte in direzione sud; difatti, un ramo del ghiacciaio scendeva verso il sito occupato ora dal Lago d'Orta e si spingeva fino a Gozzano, nei cui dintorni deponeva duplice morena frontale e due morene laterali, la sinistra sul monte granitico tra Arona ed Orta, la destra sulla catena montuosa fra Orta e Varallo. Il ghiacciaio complesso del Ticino, prima di giungere in corrispondenza di Pallanza, scavalcava con una parte dei suoi ghiacci il passo di M. Cenere, e questo ramo laterale andava a raggiungere il ghiacciaio di Lugano; più in basso, verso Luvino, un altro ramo traversava il monte e procedeva verso Varese, e per val Cuvia una terza diramazione passava ad ingrossare il ghiacciaio di Varese. Dirimpetto a Baveno, verso levante, una morena di ostacolo riveste la sponda del Lago Maggiore; altra morena consimile veniva deposta sul monte San Quirico presso Angera, finchè arrivando a sud di Arona il ghiacciaio deponeva una quadruplici serie di morene frontali e laterali, che anche oggidì si possono osservare tra Varese, Somma, Sesto Calende e la Valle

dell'Agogna; esse formano un ampio anfiteatro morenico tagliato nel suo mezzo dal corso del Ticino.

Presso Arona larga estensione di una diga porfirica è pulimentata e solcata da strie, traccie irrefragabili dell'esistenza d'un antico ghiacciaio. Quest'immensa corrente di ghiaccio chiusa fra i monti di Varese e Baveno al certo dovea avere uno spessore enorme ed una potentissima forza d'impulsione ove si consideri l'ampiezza dei circhi da cui proveniva. Sulle morene frontali del ramo di ponente, cioè di Orta, enormi blocchi di granito erratici convincono maggiormente dell'esistenza d'un antico ghiacciaio, ed alcuni sono di tal volume da costituire da sè soli vere cave di granito. Dalle valli dell'Olona, del Lambro, dell'Adda, dell'Oglio fino al Tagliamento discendevano immensi fiumi di ghiaccio ad invadere la pianura del Po; tutti lasciarono morene sviluppate, striarono e lisciarono ampie superficie di roccia, scavarono ed erosero profondamente i depositi alluvionali sottostanti nel loro sboccare dalle valli originarie; a questa loro forza erodente, scavatrice è dovuta l'esistenza di ampi bacini lacustri nella zona morenica del versante italiano delle Alpi; tanto più sviluppati sono i bacini lacustri quanto più potenti e ragguardevoli in volume ed estensione erano i ghiacciai che strisciavano sul fondo e sui fianchi delle vallate.

Capitolo II

Ipotesi per spiegare il trasporto del terreno erratico — Zattere galleggianti — Correnti — Piano inclinato di ghiaccio — Argomenti provanti l'azione di antichi Ghiacciai nel trasporto del terreno erratico.

1°) Premettiamo alcuni caratteri distintivi del terreno erratico. Il terreno erratico è costituito da materiali che, divelti dalle rocce di cui facevano parte primitivamente, furono trasportati in luoghi lontanissimi da quelli dove furono originati; il terreno erratico quindi non può aver nulla di comune colle frane e coi prodotti di sfacelo locale delle formazioni che costituiscono la catena montuosa. Dal terreno erratico conviene pure distinguere il terreno diluviale e lo alluviale, la cui formazione è dovuta a cause ben conosciute che pel primo operavano in scala molto maggiore che non operino tuttora pel secondo. I massi di grossa mole che incontransi nel terreno erratico presero il nome di blocchi erratici, e furono essi che prima attirarono lo sguardo dei geologi, poichè per essi più che per il resto dell'erratico riusciva difficile l'invocare a cause di trasporto quelle ordinarie dei terreni alluviali. In complesso, blocchi, ciottoli, frammenti, sabbia, fango costituiscono il terreno erratico.

Nel terreno erratico il volume degli elementi non è per nulla in rapporto colle distanze dal punto di partenza; anzi i blocchi erratici più voluminosi s'incontrano talvolta più lontani dalle montagne da cui furono divelti; nelle formazioni diluviali ed alluviali operatesi per azione di correnti il volume dei ciottoli e dei massi diminuisce a mano a mano che si allontanano dal punto di partenza. Gli elementi erratici conservano, anche trasportati a grande distanza, i loro angoli e spigoli acuminati e le superficie scabre, ciò che non succede negli elementi trasportati dalle acque. In questi ultimi si osserva quasi sempre una stratificazione determinabile;

ciò non succede mai nei depositi erratici. Il terreno erratico non presenta mai mescolati fra loro frammenti provenienti da località diverse, ed in una stessa vallata da ogni lato è caratterizzato da rocce identiche a quelle delle montagne che costituiscono il fianco corrispondente della vallata stessa; la Serra d'Ivrea contiene le rocce del massiccio del Rosa, non quelle del G. Paradiso e il protogino del M. Bianco che si trovano nel lato opposto della vallata. Il volume degli elementi è variabilissimo nei depositi erratici dalla polvere impalpabile a massi di oltre 100,000 piedi cubici, come constatò Charpentier nella valle del Rodano, ed il loro volume, come dissi, non decresce allontanandosi dal luogo d'origine. Succede molte volte che nei depositi erratici s'incontrino degli accumuli di blocchi di varia mole costituita da una roccia identica; ciò non si osserva mai nel terreno di alluvione e di diluvio.

Alcuni massi erratici sono disposti in modo che sembrano in equilibrio, talchè svelano un mezzo di trasporto lento e senza scosse come non sarebbe quello delle correnti; inversamente poi a ciò che succede nei terreni d'alluvione, i grossi massi erratici stanno quasi sempre superficialmente invece d'essere più profondi, ciò che sarebbe avvenuto certamente ove fossero stati trasportati dalle acque.

Il terreno erratico termina sempre ad un tratto in zone di elementi dispersi, o in dighe e collinette, per cui siamo indotti a credere che le forze del trasporto cessavano bruscamente anche quando non incontrava ostacoli davanti a sè; qual è quella corrente d'acqua che si arresta improvvisamente per se stessa senza il concorso di ostacoli repentini al suo procedere?

Poniamo anche mente al modo con cui le rocce sottostanti all'erratico e nella direzione in cui si operò il trasporto sono modificate; esse sono pulimentate, solcate, striate regolarmente in linea retta per lunghi tratti.

Ora che è stata chiamata l'attenzione sui caratteri del deposito erratico, si possono passare in rivista alcune ipotesi emesse per spiegarne il trasporto e vedere se con esse è possibile renderci ragione di tutti i fenomeni. Cominciamo da quelle che fecero arrivare là dove si trova oggidì il terreno erratico col mezzo di zattere di ghiaccio galleggianti che avrebbero portati gli elementi erratici fino ad una certa distanza dal punto di partenza, e là sciogliendosi li avreb-

bero lasciati liberi di deporsi sul fondo del bacino d'acqua su cui galleggiavano.

Anzi tutto come si depongono i materiali in seno ad un mare o ad un bacino esteso tanto e di tal livello da giungere alla regione delle nevi perpetue, e di là staccare delle zattere di ghiaccio o vere porzioni di ghiacciaio?

Evidentemente stratificandosi in ragione del loro peso; allora come spiegare l'irregolarità del terreno erratico, come spiegare il trovarsi tutti alla rinfusa massi enormi, ghiacciai, frammenti, sabbia e fanghiglia? Un mare od un bacino di acqua avrebbe avuto necessariamente un livello orizzontale; come spiegare allora la inclinazione costante e le variazioni in altezza della linea che limita sui fianchi montuosi i depositi erratici? Inoltre, come si può ammettere l'esistenza di un anpio mare o lago colla mancanza assoluta di fossili nei depositi erratici? Perchè la mancanza di quelle erosioni, terrazze o *falaises* che sono caratteristiche delle sponde dei grandi depositi di acqua? Evidentemente questa ipotesi non è ammissibile, malgrado le celebrità di alcuni geologi che se ne costituirono campioni; essa non spiega, anzi contraria molti fatti che caratterizzano i depositi erratici; come rendersi conto infatti della irregolarità d'essi depositi, della disposizione degli elementi, della formazione di strie, solchi rettilinei sulle pareti di roccia?

2°) Un'altra ipotesi propugnata fino agli ultimi tempi è quella che attribuisce a correnti il trasporto del terreno erratico; alcuni ricorsero a zattere di ghiaccio e porzioni di ghiacciaio cariche del materiale erratico trascinato da questa corrente; altri a blocchi di ghiaccio includenti gli elementi erratici trasportati collo stesso mezzo; chi non volle ammettere il concorso di zattere di ghiaccio; riguardo al prodursi di queste enormi correnti si invocò un ritiro istantaneo del mare che saliva molto in alto sui fianchi delle montagne; oppure una scossa violenta prodotta dal subitaneo apparire delle masse granitiche, oppure una rottura di dighe che chiudevano l'adito alle acque d'una moltitudine di laghi alpini, ovvero la fusione repentina di enormi ghiacciai. Senza entrare a provare l'insussistenza di tutte queste opinioni ammesse per dar ragione dell'agire e del formarsi delle correnti, cosa che molto diffusamente fece il Char-

pentier, io mi limiterò a combattere in tesi generale l'ipotesi dell'azione di grandi corsi di acqua torrenziale nel trasporto del terreno erratico.

Anzi tutto se si considerano gli effetti prodotti dalle più violente, repentine e colossali inondazioni, essi si trovano microscopici vicino a quelli prodotti da quelle supposte correnti acquee, e l'immaginazione anche più ardita non osa e non può giungere ad ammettere l'esistenza di una massa d'acqua così enorme da produrre trasporto di tanto materiale qual è quello che costituisce il terreno erratico; inoltre supponiamo per un istante l'esistenza di questo motore così possente; perchè esso avesse potuto agire, cioè essere su un piano inclinato in modo da costituirsi in corrente, le Alpi avrebbero dovuto innalzarsi ad un'altezza immensamente maggiore a quella d'oggi; mole sì grande di acqua basterebbe a cuoprire le Alpi d'oggi, e se non a cuoprirle a sommergerle fino a grandi elevazioni; ma allora come si sarebbero formate correnti e come i depositi erratici sarebbero privi di resti marini? Evidentemente cadiamo nella prima ipotesi delle zattere galleggianti. Le correnti che uscirono impetuosamente dalle vallate alpine, sia per attivissima fusione di ghiaccio, sia per rotture di sponde nei laghi, e i cui effetti ancora oggi si osservano giganti appo quelli delle più forti inondazioni odierne, a cosa diedero origine? a terreno diluviale, non a terreno erratico; ed in Italia è agevole il vedere l'erratico sovrastante al diluviale e staccarsene con tutta chiarezza per i caratteri differenziali accennati in testa a questo capitolo; le grandi correnti danno ciottoli arrotondati e smussati, non angolosi, mai striati come quelli del terreno erratico; le correnti danno una disposizione tale ai materiali di trasporti per cui questi decrescono in volume coll'allontanarsi dal punto di partenza; ciò non succede nell'erratico. Per spiegare la violenza e la forza d'azione di questa corrente e il galleggiare indispensabile dei grossi massi che s'incontrano nell'erratico, si disse che erano dotati di una velocità di oltre 200 piedi al secondo, e che si potevano considerare come correnti fangose piuttostochè acquee; ma come si può conciliare questa grande rapidità colla consistenza fangosa? D'altronde anche in correnti di fango i grossi massi erratici non avrebbero potuto galleggiare.

Inoltre, come ammettere che questa corrente prodigiosa arrivando

con tanto materiale di trasporto allo sbocco delle valli si sia arrestata immantinente in modo da formare gli anfiteatri morenici? Qual sarà la causa di questo arresto improvviso, quando appunto la pianura si estende davanti al corso furioso delle innondazioni senza presentar ostacolo alcuno?

Ove fosse lecito il diffondersi e il recare descrizioni di rocce pulimentate, striate, solcate che s'incontrano nelle vallate alpine, sarebbe agevole il dimostrare che tali tracce non possono essere state lasciate nè da correnti acquee, nè da torrenti fangosi; l'acqua corrode le rocce, ne asporta delle porzioni, ne lascia la superficie, le segna con meandri, solchi flessuosi, a cavità, a pozzette, non le pulimenta con quella regolarità che esse presentano, non le stria, nè dà luogo a solchi rettilinei, ad intaccature verticali. I ciottoli inclusi in un densissimo torrente fangoso, più duri delle rocce su cui scorrono, possono in certi casi intaccarle in punti isolati, ma non striarle così finamente, profondamente e con tanta regolarità.

Senza andar più oltre, credo aver portati argomenti bastanti ad infirmare l'ipotesi dell'azione di correnti nel trasporto del terreno erratico, e persuaderne l'inammissibilità, malgrado che uomini di grido, come Saussure, De Buch, Escher de la Liuth, Elie de Beaumont abbiano combattuto per essa, e che anche oggidi scienziati rispettabili ne siano fautori.

3^o) Vediamo ora l'ipotesi di Schimper ed Agassiz che ammette un piano inclinato di ghiaccio, su cui i materiali erratici avrebbero scivolato, e raggiunte le località ove ora si incontrano. Agassiz diceva, che ad un periodo di intensissimo freddo prodotti, e per conseguenza di estinzione della vita e formazione di enorme quantità di ghiaccio sulla superficie del luogo occupato dalle Alpi, successe un cataclisma da cui ebbe origine il sollevamento delle Alpi e dello strato glaciale sovraincombente; quest'ultimo si sarebbe fratturato, ed addossato in pendio col fianco delle Alpi, e i materiali della catena, frammentati nel cataclisma, in grande copia avrebbero scivolato su questo immenso piano di ghiaccio. Agassiz non diede ragione del prodursi di quel freddo intenso, per cui non è solida la prima base della ipotesi; inoltre

calcolando la distanza dalle vette dai punti dove si trovano i terreni erratici, ne risulterebbe un pendio così dolce da riuscire impossibile a frammenti angolosi od a spigoli taglienti lo scivolare a sì grande distanza su una superficie scabra, qual è quella ordinaria dei ghiacciai. Poi sta contro a questa ipotesi l'osservazione di fatto; i grossi massi che precipitano sui ghiacciai anche a grande inclinazione non scivolano, appena appena percorrono brevi tratti e si impiantano nella massa del ghiacciaio stesso.

Abbandonata in seguito da Agassiz questa ipotesi, non poté sussistere, e cadde come caddero molte altre, fra cui quella di un piano inclinato di roccia, e quella di esplosioni gazoze.

4°) Veniamo ora all'opinione universalmente accettata, che cioè il terreno erratico debba la sua origine all'azione meccanica di trasporto di antichi ghiacciai. Non è un caso raro nei fasti della scienza il veder sorgere da un caso pienamente fortuito una verità, sino allora ignota per quelli stessi che per lungo tempo avevano lavorato alla sua ricerca senza giungere a scoprirla. Fra gli illustri uomini che s'occuparono de' ghiacciai sul principio del presente secolo, a niuno era balenato in mente che i ghiacciai avessero potuto in tempi remotissimi estendersi ad occupare regioni lontanissime dalle vette alpine, e là dar origine a formazioni moreniche, come succede tuttodì nelle regioni delle nevi perpetue. Perraudin, montagnardo del Vallese, parlando con Charpentier, disse che, secondo lui, alcuni enormi massi granitici che sono nella valle di Bagnes tra Sembranchier e Martigny dovevano esser stati trasportati dal ghiacciaio di Getroz nell'epoca di una maggiore estensione; la parola dalle labbra del rozzo alpigiano era caduta in terreno fecondo. Charpentier vi costruì sopra l'ipotesi ora ammessa, che, oppugnata da molti, riuscì in ogni conflitto vittoriosa.

Vediamo se questa ipotesi può spiegare tutti i fenomeni che si osservano nel terreno erratico. L'epoca di formazione dell'erratico è quella del secondo periodo quaternario; alquanto posteriormente al costituirsi del diluvium, ciò risulta dal trovarsi mai sotto al diluvium, e sempre ricoperto dall'alluvione moderna: niente osta che in quell'epoca ghiacciai immensi scendessero dalle Alpi alle pianure della Svizzera e del Po.

Le morene laterali dei ghiacciai attuali constano esclusivamente di materiali analoghi a quelli delle rocce contigue da cui provengono. Esaminiamo il terreno erratico di alcune località italiane. Nell'anfiteatro morenico d'Ivrea la Serra consta delle rocce che costituiscono il massiccio del Monte Rosa, e la morena laterale destra non contiene tracce di esse rocce, ma bensì risulta da elementi tolti al Monte Bianco ed al gruppo del Gran Paradiso; nella Serra noi non troveremo mai tracce del protogino del Monte Bianco; e ciò serve anche per gli altri anfiteatri morenici. Nel terreno erratico noi incontriamo quella stessa disposizione e forme di elementi che caratterizza le morene in via di formazione. Al par del terreno erratico, le morene attuali contengono ciottoli striati. I volumi dei massi erratici tanto nelle antiche morene come nelle morene attuali è analogo, come analoga ne è la disposizione; ciò sta a dimostrare eguaglianza di causa. Come nell'erratico antico, quello moderno in via di formazione non osserva regola alcuna nel volume degli elementi a mano a mano che si allontanano dal punto di partenza. Dissi trovarsi sui ghiacciai attuali deposito glaciale sotto tre diverse forme di morene, di deposito disperso, ed in alcuni casi di strati alternanti con deposito di alluvione; ciò pure s'incontra nel terreno erratico; gli anfiteatri morenici d'Ivrea, di Rivoli, di Arona ed altri molti presentano contemporaneamente e morene e deposito glaciale disperso. In Isvizzera molte valli secondarie sboccanti in una principale hanno torrenti che tagliano dei depositi glaciali stratificati; e furono esse valli nella condizione più favorevole per dar luogo, collo sbarramento dei corsi d'acqua per opera del ghiacciaio principale, ad accumuli d'acqua ove il materiale morenico si deponeva tranquillamente. Nel terreno erratico s'incontrano ammassi isolati d'una stessa roccia; ma ciò succede anche quando delle frane rovinano su un ghiacciaio attuale, e degli accumuli d'una medesima roccia rimangono isolati e così vengono a deporsi sulla morena terminale.

Le strie, le solcature, le pulimentazioni delle rocce in quasi tutte le vallate sono le corrispondenti di quelle che si osservano oggidì sul fondo dei ghiacciai attuali. Le strie verticali che si mostrano in alcune gole anguste, perchè non avranno la stessa origine di quelle che si formano o per ristrettezza della vallata in

cui discende un ghiacciaio attuale, o per un aumento di spessore del medesimo. L'altezza stessa a cui giunge il terreno erratico ci prova la sua provenienza glaciale; i ghiacciai per essere più estesi dovevano necessariamente discendere con pendio più dolce ed avere un livello superiore a quello d'oggi. E poi chi non vedrà una analogia palese fra il modo di terminazione dei depositi glaciali moderni e quello con cui finisce l'erratico nelle pianure e sui fianchi delle elevazioni? Basta vedere una volta una morena frontale in via di formazione per essere persuasi e convinti che le colline di Rivoli, quelle di Caluso sono morene frontali. Io credo che gli argomenti portati sono tali da mettere l'ipotesi del trasporto glaciale al coperto da ogni attacco; le numerose obiezioni che furono fatte ad essa non hanno avuto il potere di infirmarla, giacchè molte di esse si fondavano su fatti falsamente interpretati, e poi si emettevano per appoggiare teorie insufficienti a spiegare tutti i fenomeni. Questa ipotesi rende ragione di ogni fatto non solo per la via del ragionamento, ma coincide coll'osservazione diretta, e ciò è tutto in geologia. Gli oppositori si spaventavano all'idea del freddo intenso che doveva regnare all'epoca di grande estensione dei ghiacciai; ma qui ricordo il calcolo di Martius riferito in principio della seconda parte della dissertazione: umidità atmosferica più che bassa temperatura fa d'uopo per lo sviluppo dei ghiacciai.

Capitolo III

Riescavazione dei bacini lacustri per opera dei Ghiacciai — Teoria di Ramsay — Teoria di Mortillet — Teoria di Desor — Ritiro dei Ghiacciai — Cagione.

1°) I ghiacciai antichi avanzandosi in forza dell'attivissima evaporazione nelle pianure, erano soggetti ad una grande e potente ablazione, giacchè la temperatura allora dominante doveva essere piuttosto elevata. Per l'attiva fusione si formavano torrenti di forza e potenza tale da trascinare seco in basso i materiali morenici che si deponevano al piede de' ghiacciai; questi materiali perdevano i caratteri distintivi dei glaciali, ed assumevano invece quelli degli alluvionali; arrivando questi enormi massi di acqua carichi di tanta materia allo sbocco delle vallate si espandevano, e rallentando il loro corso depositavano su una larga superficie ciò che avevano seco loro trascinato, così si formarono i coni di deiezione come già accennai, con i vertici allo sbocco delle vallate; dico che *facevano vertice*, perchè dei molti formati nella pianura del Po, alcuni pochi solo si addentrano anche oggidì colla loro porzione superiore nelle valli da cui provengono; negli altri il vertice fu asportato, eroso, e da quale agente? Da quegli stessi ghiacciai che seguitando ad avanzarsi giunsero fino ad invadere la pianura; il cono di deiezione della valle della Stura di Lanzo mostra tuttora intatto il suo apice proprio allo sbocco della vallata, perchè il ghiacciaio da cui questa era occupata non si estendeva fino alla pianura. Da Torino prima di giungere all'imboccatura della valle Susina si trova invece mancare quasi istantaneamente il diluvium là dove comincia il morenico.

Alcuni ammisero una forza erodente, escavatrice nei ghiacciai antichi, altri la esagerarono, altri infine la negarono affatto; da ciò una lotta di opinioni che diede luogo a molte osservazioni

accurate, a lavori preziosi, e ad una viva discussione non per anco esaurita e tuttodi in pieno vigore. Esaminiamo la quistione con rapido sguardo; fra gli interessati ad essa tre schiere si costituiscono; la prima capitanata da Ramsay ammette non solo *che i ghiacciai antichi abbiano avuto la forza di riescavare quei bacini orografici già formati prima dell'epoca glaciale, e riempiti in seguito dall'antica alluvione trascinata dai torrenti glaciali, ma eziandio che essi bacini siano stati fin da principio scavati nella viva roccia dagli stessi ghiacciai*. Ramsay evidentemente ha esagerata la forza escavatrice glaciale; per quanto enorme debba essere stata la pressione esercitata dal ghiacciaio complesso della Toce e del Ticino (350,000 chilogrammi per ogni centimetro quadrato), la ragione si rifiuta ad ammettere che esso sia riuscito a scavare un bacino come quello del Lago Maggiore, a 700 metri di profondità in rocce granitiche, porfiriche e cristalline. Non meno imponente era il ghiacciaio della Dora Baltea; ora perchè concedere al primo la forza di escavazione, e negarla poi al secondo? Difatti allo sbocco della valle d'Aosta non solo non havvi un bacino lacustre, ma rimane intatto ed appena arrotondato un cordone dioritico, che innalzandosi di ben 60 a 100 metri sul piano dell'anfiteatro morenico lo attraversa in linea obliqua da un fianco all'altro. Se il ghiacciaio del Ticino avesse scavato il Lago Maggiore, perchè scavarcelo così ristretto in corrispondenza di Baveno ed Angera, in modo da dimostrare piuttosto che esso si sia adattato alla forma che gl'impondeva un passaggio angusto preesistente? Se si potesse ammettere l'ipotesi di Ramsay, io non saprei vedere la ragione di invocare altri agenti per la configurazione attuale delle Alpi; le vallate si dovrebbero evidentemente all'azione erodente dei ghiacciai. Presa la proporzione di sviluppo fra i ghiacciai antichi e moderni, si trova che il rapporto non è identico fra i fenomeni di escavazione nei due periodi; gli attuali scavano alquanto il fondo di roccia su cui posano, ma non a quel grado che ammetterebbe Ramsay; per poco che facesse, essa verrebbe a far derivare dall'azione escavatrice di ghiacciai antichi il Lago Superiore d'America e i mari interni, quali l'Adriatico, il Mar Nero, il Caspio.

Evidentemente questa opinione pecca di esagerazione, e non si può accettare perchè non renderebbe conto di molte eccezioni e sarebbe in antagonismo con ciò che osservasi oggidì in natura.

2^o) Mortillet ammette con molti altri geologi che *i ghiacciai antichi arrivando là ove preesistenti bacini orografici erano stati riempiti dal diluvium li abbiano riescavati, spingendo fuori il terreno alluvionale antico, lasciando poi nel ritirarsi un ampio vuoto in cui si accumulò l'acqua di fusione*. Il professore Gastaldi di Torino, accurato osservatore dei fenomeni glaciali in Piemonte, si stabilì fautore di questa teoria, ed i suoi argomenti hanno facilità di convincere, appoggiati come sono da fedeli spaccati geologici.

Che i ghiacciai abbiano una certa forza escavatrice non si può negare; gli altipiani delle Alpi sono ordinariamente costituiti da enormi gradini, ognuno dei quali è depresso nel suo mezzo; a valle di questa depressione prima di scendere in uno scaglione od in una forza sottostante esiste quasi sempre una morena terminale; la depressione mediana non è visibile, giacchè il livello è reso orizzontale per uno strato di deposito melmoso evidentemente laticustre; questi altipiani si possono considerare come fondo di antichi laghi prodotti dall'accumularsi di acque nelle depressioni lasciate dai ghiacciai, acqua il cui corso era sbarrato da una morena, nuovo documento per attribuire alla escavazione glaciale la formazione degli altipiani; se la forza escavatrice d'un ghiacciaio non può dar luogo ad erosioni molto profonde nella viva roccia, può però produrre effetti imponenti quando opera sopra un terreno incoerente qual è quello di alluvione. Sulle sponde del Lago Maggiore, tanto all'entrata della Toce e del Ticino, quanto all'uscita di quest'ultimo dal Lago stesso, esiste il terreno diluviale pressochè a pari livello; ora come è avvenuto che questo materiale di trasporto si sia depositato a monte del Lago, e contemporaneamente sia passato alla sponda opposta, e là abbia dato luogo ad una formazione identica alla prima per modo da far nascere l'idea che tanto l'una che l'altra non siano che le porzioni di uno stesso deposito? Ecco come ciò spiegano i campioni della

riescavazione; il bacino del Lago Maggiore, come quelli di altri laghi compresi tra la zona morenica e la regione montuosa, erano già formati prima del periodo glaciale per effetto di ripiegamenti, increspamenti dovuti a precedente sollevamento alpino; i ghiacciai mandando avanti nel loro estendersi una quantità enorme di materiali da alluvione, i bacini che si trovavano sul suo passaggio ne furono colmati, e seguitando a giungere del diluvium anche dopo il riempimento dei bacini orografici, esso venne a depositarsi a valle dei medesimi, formando come un unico deposito a mascherare le accidentalità del suolo sottostante; sopraggiunsero i ghiacciai; con una pressione enorme esercitata in piano inclinato incontrarono questo materiale incoerente già di sua natura, ed anche più perchè appena formato, s'internarono fra la viva roccia ed il diluvium e riuscirono a spingerlo in alto sulla sponda opposta; ritirandosi poi nella successiva fusione non giunsero a colmare coi materiali morenici il vano operato, ed ecco come il bacino orografico riempito dal diluvium venne ad essere riescavato dal ghiacciaio.

Che questa teoria forse non si possa generalizzare per tutti i laghi che sono al piede delle Alpi, lo credo ammissibile; ma che essa si debba assolutamente abbandonare, non è possibile, quando l'osservazione di fatti locali la confermano pienamente. Da Torino seguendo il corso della Dora Riparia si arriva a Collegno, ove le ondulazioni del terreno seguono la presenza di deposito glaciale disperso; a Pianezza segue lo stesso deposito ricco di blocchi erratici, ed al disotto di esso incontrasi il diluvium disposto in un dolce pendio verso il Po; proseguendo da Pianezza verso Alpignano, nell'alveo profondamente tagliato della Dora si osservano sempre il diluvium ed il morenico sovrapposti, l'uno dall'altro distinti, finchè sviluppandosi quest'ultimo manca quasi improvvisamente il diluvium, e si vede chiaramente che il vertice del cono di deiezione fu eroso ed esportato; e lo fu sicuramente per opera del ghiacciaio, perchè là dove cessa il diluvium comincia la vera morena frontale, e l'erosione coincide quindi col limite inferiore del ghiacciaio stesso; una corrente di acqua avrebbe tagliato profondamente il diluvium, non eroso in circolo come colà si osserva; se non si può invocare una corrente di acqua, qual sarà stato

l'agente erosivo se non il ghiacciaio? La cosa è così evidente, che per l'anfiteatro morenico di Rivoli l'azione erodente dei ghiacciai antichi è pienamente confermata; supponendo che in quelle località un bacino lacustre fosse stato previamente riempito di diluvium, è chiaro che questo sarebbe stato spinto fuori dal bacino, come fu realmente spinto in avanti dal ghiacciaio nel suo procedere; questa circostanza di un bacino preesistente si verifica in altri siti, e là ebbe luogo la riescavazione. Dove i ghiacciai non giunsero alla pianura, i coni di deiezione sussistono intieri e non presentano erosione al vertice; quale conferma più splendida di questa?

Havvi di più; Mortillet, studiando i contorni del lago d'Iseo, trovò che sulla sponda meridionale i conglomerati diluviali presentano le testate di strati rialzati contro la direzione del ghiacciaio antico; ciò si spiega coll'ammettere che il ghiacciaio, riescavando il bacino lacustre d'Iseo, trovò il diluvium dotato d'una certa compattezza, per cui nell'atto della spinta dal basso all'alto esso poté resistere e non disaggregarsi così agevolmente, come fece in altri siti; a che dovremo noi attribuire questo fenomeno se non all'azione possente, uniforme, costante, lentissima del ghiacciaio in avanzo? Una corrente di acqua avrebbe scavato un alveo negli strati diluviali; mai li avrebbe sollevati.

I materiali del diluvium come avrebbero potuto passare a valle del Lago Maggiore se il bacino orografico non fosse stato riempito? Si può mettere che esso sia disceso al fondo del bacino e poi rimontato dalla parte opposta per 700^m? No sicuramente.

5°) Di alcune obbiezioni fatte alla teoria di Mortillet dirò esponendo la opinione decisamente contraria di Desor e Favre. Essi non ammettono che i ghiacciai abbiano colmato i bacini orografici colle loro alluvioni, e li abbiano in seguito riescavati coi loro ghiacci; dicono invece che *rapidamente avanzandosi i ghiacciai antichi non diedero tempo ai materiali di alluvione di colmare i bacini, ma che essi stessi giunsero a riempirli coi loro ghiacci; che avanzandosi continuamente andarono a deporre le morene a valle di essi bacini; ritirandosi finalmente lasciarono depositi*

alluvionali a valle ed a monte di essi ed i bacini colmi di ghiaccio che per fusione si trasformò in acqua. Questa teoria, a cui è fedele anche l'italiano Omboni, non richiede per nulla l'azione erosiva dei ghiacciai nella conservazione dei bacini lacustri; ma richiede per altra parte una celerità tale di avanzamento che non so se si possa ammettere, in quanto che riesce più malagevole il renderci ragione di essa che non della forza escavante che doveano avere i ghiacciai d'allora; quest'ultima è confermata dalle osservazioni fatte in alcune località; per accertare tanta velocità nel corso di un ghiacciaio non abbiamo dato alcuno. Obbiettano contro l'ipotesi di riescavazione, che tal fatto non sarebbe concorde con ciò che si osserva nell'attualità; anzitutto i ghiacciai moderni sono microscopici vicino agli antichi, inoltre difficilmente incontrano dei bacini da poter riempire di terreno morenico o alluvionale, nè si spingono tanto avanti da dar luogo alla riescavazione dei bacini colmati, considerando pure che dall'epoca in cui venne messa in campo la quistione, i ghiacciai sono quasi tutti in un periodo di ritiro; finalmente gli altipiani alpini già accennati non provano a sufficienza la potenza escavatrice dei ghiacciai, e non su materiali incoerenti, ma su rocce massiccie? Come si possono spiegare le modificazioni indotte nelle pudinghe e nei conglomerati diluviali di Iseo colla teoria di Desor? Favre combatte l'ipotesi della escavazione del bacino del Lago di Ginevra per opera del ghiacciaio del Rodano, ed osserva che desso lago non si trova realmente sulla direzione che dovea tener il ghiacciaio, e fa notare la coincidenza dell'esistenza del lago con quella di un sinclinale in cui stanno accumulate le acque; ripeto che probabilmente l'azione erodente dei ghiacciai per la escavazione dei bacini lacustri non si può invocare dovunque; ma per alcune località ove trattasi di riescavazione di bacini ricolmi non può essere messa in dubbio.

Obbiettano pure contro la teoria di Mortillet domandando spiegazione del perchè s'incontrino laghi allo sbocco di alcune soltanto delle valli alpine occupate anticamente da grandi ghiacciai; ma quest'è un fatto che conferma da una parte l'ipotesi di Mortillet, e dall'altra sta contro a quella di Ramsay; i ghiacciai hanno riescavati i bacini orografici ricolmi dal diluvium, quindi non si troveranno laghi là dove non esistevano bacini orografici prima del periodo glaciale,

giacchè l'azione erosiva dei ghiacciai non poteva esercitarsi così potentemente sulle rocce in posto da dar luogo a dei laghi. I ghiacciai si ritirarono in seguito per un più attivo processo di fusione tale da preponderare sulla alimentazione; ma essendo quindi l'ablazione più forte, maggior quantità di materiale morenico dovea essere trasportato in basso; questo aumento noi non lo avvertiamo perchè assorbito nel riempimento del vuoto lasciato dal ghiacciaio sul bacino ri-escavato, riempimento che non fu completo.

La quistione, come dissi, non è anche risolta; nuove osservazioni faranno pendere la bilancia dall'una o dall'altra parte; forse però nè l'ipotesi di Mortillet, nè quella di Desor potranno essere esclusivamente invocate per spiegare l'origine dei laghi glaciali in tutte le località dove essi esistono.

4°) Chiuderò la mia dissertazione coll'accennare alle cause che produssero il ritiro dei ghiacciai. La calda temperatura, la forte evaporazione e l'umidità dei venti provenienti dal sud occasionarono l'enorme sviluppo dei ghiacciai. Abbassamento di temperatura per assorbimento nella fusione dei ghiacciai, quindi consecutiva diminuzione di evaporazione ridussero a minore proporzione l'alimento dei ghiacciai, per cui questi struggendosi più di quello che si nutrivano, doveano certamente diminuire in volume ed estensione. Il formarsi di una terra nuova emersa, il deserto di Sahara, con una parte di fondo marino al sud dell'Europa fece sì che i venti arrivavano non più caldi ed umidi, ma bensì caldi e secchi, ed ecco favorirsi la fusione, non più l'evaporazione, e cessare affatto il condensarsi sulle Alpi di quei vapori che prima provenivano da mezzogiorno. Finalmente la vegetazione che rigogliosa s'era sviluppata nelle regioni non invase dai ghiacciai assorbiva una grande umidità, e molto minore era l'acqua che poteva risolversi in neve, di quella che veniva dalle piante assorbita. Allora ebbe luogo il ritirarsi lento ed interrotto a più riprese dei ghiacciai, si formarono i fiumi ed i torrenti che ora solcano le valli alpine; prima arrestati dalle morene si costituirono in laghi, indi rotte le dighe che li chiudevano, uscirono dalle cerchie moreniche tagliandole profondamente.

I ghiacciai nel continuo retrocedere subivano periodi di sosta, ed ecco l'origine delle morene terminali, i cui resti si osservano anche oggidi a vari intervalli nelle vallate.

Con ciò io pongo fine alla dissertazione, e farò un'ultima considerazione, che cioè lo studio dei ghiacciai ebbe in questi ultimi tempi un nuovo impulso a cui forse dovremo la spiegazione di molti fatti ravvolti ancora nel mistero; e di questo ramo delle scienze geologiche si potrà avere un complesso tale di cognizioni precise ed accertate da poter stare a confronto cogli altri rami della geologia.



115409

